

TUGAS AKHIR

ANALISA PENYEBAB TERJADINYA KEAUSAN PADA BEARING CROSSHEAD KAPAL MT GAS LAURA

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

Disusun Oleh:

MHD ZULHILMI NASUTION
2107230138



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

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

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh :

Nama : Mhd Zulhilmi Nasution

Npm : 2107230138

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tugas Akhir : Analisa Penyebab terjadinya keausan pada bearing
crosshead Kapal Mt.gas laura

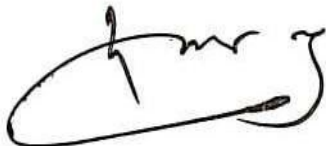
Bidang Ilmu : Konversi Manufaktur

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, 17 Juli 2025

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Penguji I



Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T

Dosen Penguji II



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

Dosen Penguji III



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

Program Studi Teknik Mesin Ketua



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

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Lengkap : Mhd Zulhilmi Nasution
Tempat/ Tanggal Lahir : Binjai, 20 Mei 2003
Npm : 2107230138
Bidang Keahlian : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
(UMSU)

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

“Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada Bearing Crosshead Kapal Mt.Gas Laura”

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

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

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

Medan, 06 Februari 2026

Saya yang menyatakan



MHD ZULHILMI NASUTION

2107230138

ABSTRAK

Bearing crosshead adalah komponen vital mesin induk kapal yang menghubungkan piston dengan *connecting rod* untuk mengkonversi gerakan *reciprocating* menjadi gerakan *rotary crankshaft*. Mengingat pentingnya komponen ini, penelitian dilakukan di PT. Waruna Shipyard Indonesia, Medan Belawan untuk menganalisis kerusakan *bearing crosshead* pada kapal MT. Gas Laura. Penelitian menggunakan metode inspeksi visual, pengukuran *clearance* dengan benang *locis*, dan pembongkaran komponen *engine* yang kemudian menghasilkan temuan tiga jenis keausan yaitu *abrasive wear*, *adhesive wear*, dan *corrosive wear* pada silinder 1, 3, dan 5. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa keausan tersebut berakar dari *clearance* yang tidak sesuai spesifikasi, yang selanjutnya dipicu oleh kontaminasi partikel asing dalam oli pelumas, *misalignment* pemasangan, kualitas pelumasan tidak memadai, dan *running hours* berlebihan. Kondisi *clearance* yang tidak optimal ini menyebabkan gesekan berlebihan dengan *crosshead pin* sehingga mengganggu suplai pelumasan dan memperparah keausan. Setelah dilakukan penggantian komponen dan pengukuran ulang *clearance*, hasil menunjukkan perbaikan signifikan yang membuktikan efektivitas solusi yang diterapkan.

Kata kunci: *Bearing Crosshead*, *Keausan*, *Clearance Bearing*, Kontaminasi Pelumasan, *Running Hours*.

ABSTRACT

Bearing crosshead is a vital component of ship main engines that connects the piston to the connecting rod to convert reciprocating motion into rotary crankshaft movement. Given the importance of this component, research was conducted at PT. Waruna Shipyard Indonesia, Medan Belawan to analyze bearing crosshead damage on MT. Gas Laura vessel. The research employed visual inspection methods, clearance measurement using locis thread technique, and engine component disassembly, which subsequently revealed three types of wear: abrasive wear, adhesive wear, and corrosive wear on cylinders 1, 3, and 5. Further analysis indicated that the wear originated from clearances not conforming to specifications, which was subsequently triggered by foreign particle contamination in lubricating oil, component installation misalignment, inadequate lubrication quality, and excessive running hours. This non-optimal clearance condition caused excessive friction with the crosshead pin, thereby disrupting oil supply and exacerbating the wear. After component replacement and clearance re-measurement, results showed significant improvement that demonstrated the effectiveness of the implemented solution.

Keywords: Crosshead Bearing, Wear, Bearing Clearance, Lubrication Contamination, Running Hours.

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 proposal penelitian ini dengan judul —Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada *Bearing Crosshead* Kapal Mt.Gas Laural.

Bayak 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 yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
2. Bapak Chandra Amirsyah Siregar S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Ahmad Marabdi Siregar, S.T., M.T Selaku Sekretaris Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Bapak Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Dr. Khairul Umurani, S.T., M.T selaku Wakil Dekan I Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Affandi, S.T., M.T selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Kedua orang tua tercinta penulis yaitu Ayahanda Hidayat Nasution dan Ibunda Siti Saroh Batubara yang telah mengasuh, mendidik, serta senantiasa memberikan kasih sayang, do'a yang tulus dan dukungan moril maupun material sehingga penulis dapat menyelesaikan studi di Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Rekan – rekan seperjuangan, Salomo Hotma Raja Pakpahan, Muhammad Subhan Gunadi, Putra Pratama, Mhd Nur Saragih, M Abdul Azis, Jainal Rosidi, Liyum Dzira Damanik, M Farhan Ramadhan Siahaan, Muhammad Ibnu Sina.

9. Rekan – rekan seperjuangan kelas C1 Pagi Stambuk 2021, serta rekan – rekan bidang keahlian konversi manufaktur yang telah banyak memberi saran dan dukungan kepada penulis.

Proposal 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, 17 Juli 2025

Penulis

MHD ZULHILMI NASUTION

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Mesin diesel	4
2.1.1 Prinsip Kerja Mesin Diesel	5
2.1.2 Komponen Utama Mesin Induk Kapal	8
2.2 Sistem <i>Crosshead</i>	13
2.3 <i>Bearing Crosshead</i>	14
2.3.1 Fungsi <i>Bearing Crosshead</i>	15
2.3.2 Konstruksi dan Material <i>Bearing Crosshead</i>	16
2.3.3 Cara Kerja <i>Bearing Crosshead</i>	17
2.4 Gejala Awal Keausan <i>Bearing Crosshead</i>	17
2.4.1 Gejala yang Bisa Dirasakan Saat Operasi	17
2.4.2 Gejala Pada Sistem Pelumas	18
2.4.3 Gejala Suhu (<i>Thermal</i>)	18
2.5.1 Keausan <i>Adhesif</i>	19
2.5.2 Keausan <i>Abrasif</i>	20
2.5.3 Keausan <i>Fatigue</i>	21
2.5.4 Keausan Korosi	22
2.6 Sistem Pelumasan Pada <i>Bearing Crosshead</i>	23
2.7 Penyebab Keausan <i>Bearing Crosshead</i>	24
2.7.1 Beban dan Tekanan Berlebih	25
2.7.2 Pelumasan yang Tidak Optimal	26
2.7.4 Kondisi Operasional Ekstrem	27
2.7.5 Faktor Desain dan Manufaktur	27
2.8 Analisis Keausan <i>Bearing Crosshead</i>	28
BAB 3 METODE PENELITIAN	31
3.1 Tempat dan Waktu	31
3.2 Bahan dan Alat	31
3.3 Bagan Alir Penelitian	37
3.4 Rancangan Penelitian	38
3.5 Prosedur Penelitian	39
3.7 Langkah-langkah Pengukuran Keausan Pada <i>Crosshead Bearing</i> Pada	

Mesin Induk	42
3.8 Variabel Penelitian	42
3.9 Pengumpulan Data	43
3.10 Pengolahan Data	43
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Hasil Penelitian	44
4.2 Langkah – langkah pembongkaran bearing crosshead pada mesin.	46
4.3 Pengukuran pada bearing crosshead.	49
4.4 Penanganan permasalahan keausan bearing crosshead.	57
4.5 Analisa Penyebab Keausan Bearing Crosshead.	58
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	62
Lampiran 1 SK Pembimbing	63
Lampiran 2 Lembar Asistensi	64
Lampiran 3 Berita Acara Setelah Seminar Tugas Akhir	65
Lampiran 4 Daftar Riwayat Hidup	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mesin Diesel Penggera Utama Kapal (Handoyo, 2014)	4
Gambar 2.2 Disel 4 tak (Handoyo, 2014)	6
Gambar 2.3 Disel 2 Tak (Handoyo, 2014)	8
Gambar 2.4 Engine Blok (Arik H. 09 : 2014)	8
Gambar 2.5 Kepala Silinder (Arik H. 09 : 2014)	9
Gambar 2.6 Piston (Arik H. 09 : 2014)	10
Gambar 2.7 Piston Rod (Bambu Penghubung Crosshead ke Piston) (P.T WSI)	10
Gambar 2.8 Sistem Crosshead (P.T Waruna Shipyard Indonesia)	11
Gambar 2.9 Batang Penghubung (Arik H. 09 : 2014)	11
Gambar 2.10 Poros Engkol (Arik H. 09 : 2014)	12
Gambar 2.11 Camshaft (Arik H. 09 : 201)	12
Gambar 2.12 Roda Gila (Arik H. 09 : 2014)	13
Gambar 2.13 Sistem Crosshead Pada Main Engine (Mesin Induk Kapal) (Sham Yadav 2024)	13
Gambar 2. 14 Bearing Crosshead (PT.WSI)	14
Gambar 2.15 konstruksi bearing (Tommy K, 2018)	15
Gambar 2.16 Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Gesek (Burwell,1957)	19
Gambar 2.17 Mekanis keausan <i>Abrasive</i> (Burwell,1957)	20
Gambar 2.18 menunjukkan mikroskopik suatu material karena keausan lelah (Burwell,1957)	21
Gambar 2.19 mekanisme keausan lelah (Burwell,1957)	21
Gambar 2.20 Keausan Korosif Pada Baja (Burwell,1957)	22
Gambar 2.21 Sistem Pelumasan Pada Msin induk Kapal (marinesite)	23
Gambar 31. Bearing Crosshead (PT.WSI)	32
Gambar 3.2 Crosshead (Anil Samotra 2021)	32
Gambar 3.3 Jack Pump (PT. Waruna shipyard indonesia)	33
Gambar 3.4 selang Jack Pump (PT.Waruna Shipyard Indonesia)	33
Gambar 3.5 Glend Jack Pump (PT. Waruna Shipyard Indonesia)	34
Gambar 3.6 Takal (PT. Waruna Shipyard Indonesia)	34
Gambar 3.7 Manual Book (PT. Waruna Shipyard Indonesia)	35
Gambar 3.8 Benang Locis (Segelplastik)	35
Gambar 3.9 Mikrometer (PT.Waruna shipyard indonesia)	36
Gambar 3.10 Bagan Alir Penelitian	37
Gambar 3.11 Rancangan Bearing Crosshead dan Pengukuran Dengan Micrometer	38
Gambar 3.12 Rancangan Pengujian Clearance dengan Benang Locis (Liner and Ovality Clearance Indicator System)	38
Gambar 3.13 Data Ukur <i>Bearing crosshead</i> (PT. Waruna Shipard Indonesia)	39
Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Clearance Crosshead Bearing (PT. WSI)	44
Tabel 4.2 Data Pengukuran Bearing Crosshead (PT. WSI)	46
Tabel 4.3 Analisis Visual Bearing Crosshead	47
Gambar 4.4 Proses Cleaning Bearing dan Pengukuran (PT.WSI)	47
Gambar 4.5 Proses Pembongkaran Lower Bearing Crosshead (PT.WSI)	48
Gambar 4.6 Proses pelepasan pengikat Pin Crosshead dan Pengangkatan Pin Crosshead (PT.WSI)	48

Gambar 4.7 Pengukuran Clearance Bearing Crosshead (PT.WSI)	49
Gambar 4.8 Pengukuran Ketebalan Bearing Crosshead (PT.WSI)	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Waktu Penelitian	31
Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Clearance Crosshead Bearing (PT. WSI)	45
Tabel 4.2 Data Umur Operasional Bearing Crosshead (PT. WSI)	50
Tabel 4.3 Data Pengukuran Bearing Crosshead (PT. WSI)	50
Tabel 4.4 Ringkasan Keausan Berdasarkan Umur Pakai	55
Tabel 4.5 Visual Bearing Crosshead	55

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
F_s	Gaya Statis Maksimum	Kgf/N
μ_s	Koefisien Gesek Statis	
N	Gaya Normal Yang Bekerja	N
F_k	Gaya Gesek Kinetis Maksimum	Kgf/N
μ_k	Koefisien Gesekan Kinetis	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Waruna Shipyard Indonesia adalah perusahaan yang bergerak pada bisnis galangan kapal (building dan repair) yang terletak di Kelurahan Bagan Deli, Medan Belawan, Sumatera Utara. PT. Waruna Shipyard Indonesia melakukan pembangunan dan perbaikan semua tipe kapal mulai dari kapal penumpang, kapal pengangkut container, kapal pengangkut kendaraan hingga kapal tanker untuk crude oil, kapal pengangkut semen dan tipe lainnya. Dalam operasionalnya, perbaikan permesinan kapal menjadi salah satu fokus utama, terutama pada mesin induk sebagai komponen paling vital dalam sistem propulsi kapal. Salah satu permasalahan yang sering dihadapi dalam perbaikan mesin induk adalah keausan pada bearing crosshead, seperti yang terjadi pada kapal MT Gas Laura, yang memerlukan analisa penyebab secara mendalam untuk menentukan solusi perbaikan yang tepat dan mencegah kerusakan serupa di masa mendatang.

Mesin induk kapal berfungsi sebagai penggerak utama yang mengubah energi bahan bakar menjadi tenaga untuk menggerakkan propeller. Dalam sistem kerja mesin induk, crosshead memiliki peran penting sebagai penghubung antara piston dan connecting rod yang meneruskan tenaga dari pembakaran di ruang silinder menuju crankshaft. Sistem propulsi kapal yang handal menjadi kunci utama dalam menjamin kelancaran operasional kapal, dimana mesin induk sebagai jantung dari sistem propulsi harus mampu beroperasi dalam kondisi optimal dan berkelanjutan (Taufik, 2016).

Bearing crosshead merupakan komponen bantalan yang terletak pada sambungan antara crosshead pin dengan connecting rod, yang bertugas mengurangi gesekan dan memungkinkan gerakan halus antara kedua komponen tersebut. Dalam kerjanya, bearing crosshead harus mampu menahan beban yang berubah-ubah dengan kecepatan tinggi. Pelumasan yang tepat menjadi kunci utama kinerja bearing crosshead, dimana oli pelumas harus mampu membentuk lapisan yang stabil untuk mencegah gesekan langsung antara permukaan logam (Woodyard, 2020).

Menurut penulis, keausan pada bearing crosshead secara langsung mempengaruhi kinerja mesin induk dan dapat menimbulkan dampak yang merugikan operasional kapal. Ketika bearing mengalami keausan, mesin induk akan menunjukkan gejala seperti getaran abnormal, suara mesin yang tidak normal, dan peningkatan konsumsi oli pelumas. Keausan yang berlanjut dapat menyebabkan kerusakan pada crosshead pin dan connecting rod, yang pada akhirnya akan mengganggu seluruh sistem transmisi tenaga mesin.

Di PT. Waruna Shipyard Indonesia, bearing crosshead menjadi komponen yang sering mengalami kerusakan pada mesin induk kapal yang masuk untuk diperbaiki. Salah satu kasus yang terjadi adalah pada kapal MT Gas Laura yang mengalami keausan bearing crosshead cukup signifikan. Kerusakan ini tidak hanya menyebabkan biaya perbaikan tinggi dan waktu docking yang lama, tetapi juga mempengaruhi kinerja mesin secara keseluruhan.

Menurut penulis, setiap komponen yang bergerak pasti mengalami keausan akibat adanya dua benda yang saling berkontak atau bergesekan. Faktor-faktor seperti kecepatan, tekanan, pelumasan, kekasaran permukaan, dan kekerasan bahan sangat mempengaruhi tingkat keausan yang terjadi. Kondisi operasi bearing crosshead yang unik dengan gerakan bolak-balik dan beban tinggi menyebabkan komponen ini sangat rentan terhadap keausan dan memerlukan perhatian khusus dalam perawatan.

Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menganalisis penyebab kerusakan bearing crosshead dan mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan keausan pada bearing crosshead mesin induk kapal MT Gas Laura. Penelitian ini akan menganalisis kondisi keausan berdasarkan pengukuran dan standar manual book, sehingga dapat memberikan solusi perbaikan yang tepat dan mencegah kerusakan serupa di masa mendatang.

Berdasarkan dengan latar belakang tersebut, peneliti terinspirasi untuk melaksanakan penelitian dengan mengangkat judul —Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada *Bearing Crosshead* Kapal Mt. Gas Laural

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana menganalisis Kerusakan *Bearing Crosshead*?
2. Bagaimana memperjela faktor yangf menyebabkan keausan pada *bearing*

crosshead mesin induk kapal MT. Gas Laura?

1.3 Ruang Lingkup

1. Pembahasan penyebab keausan *Bearing Crosshead* di lakukan pada *engine* PT. Waruna shipyard indonesia.
2. Data Ukuran keausan *Bearing Crosshead*.
3. Metode yang digunakan berupa metode analisis.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi Kerusakan Akibat Keausan *Bearing Crosshead* Pada Kapal MT.gas laura.
2. Menganalisis penyebab terjadinya keausan yang menyebabkan performa mesin menjadi tidak optimal.

1.5 Manfaat Penelitian

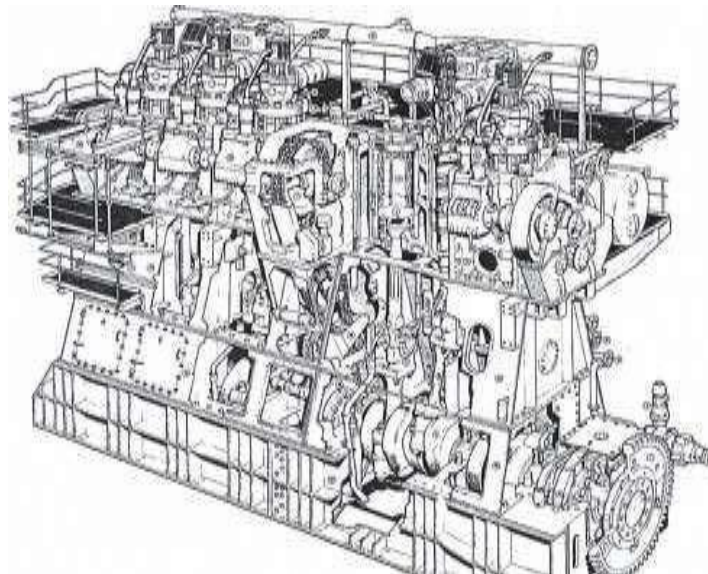
1. Dapat mengetahui kerusakan pada *bearing crosshead*.
2. Dapat mengetahui dampak kerusakan pada *bearing crosshead*.
3. Dapat menjadi sumber referensi pembelajaran dibidang permesinan kapal dalam menambah bahan ajar bagi pembaca.
4. Dapat memberikan informasi bagi para peneliti untuk melaksanakan penelitian lanjutan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin diesel

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 diatas 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, S. (2021). Sebuah mesin dengan pemacu 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, W. D., & Prihastuty, E. (2018, June).



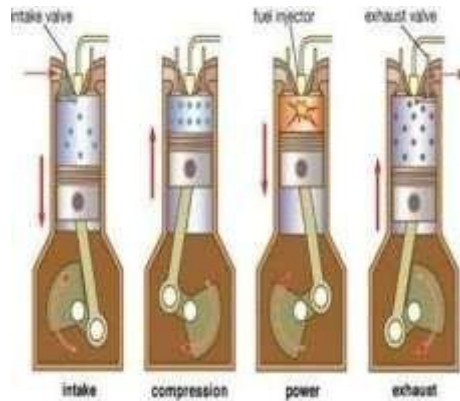
Gambar 2.1 Mesin Diesel Penggerak Utama Kapal (Handoyo, 2014)

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. 5^0 sampai dengan 10^0 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 10^0 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° sebelum TMA sampai sekitar 5° 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.

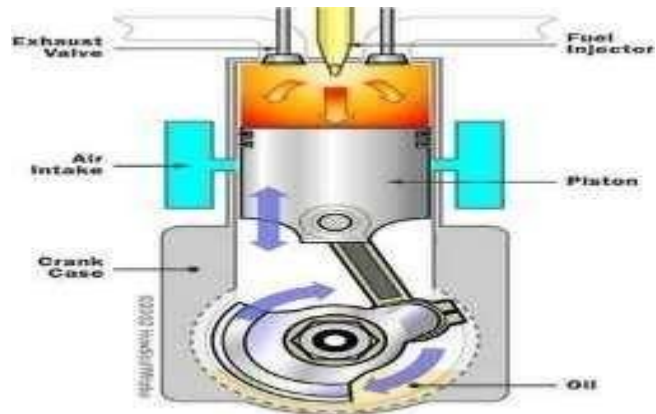
2. Langkah Kedua Pembilasan, Kompresi dan Pembakaran

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 1.2000⁰ 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 Induk Kapal

Mesin induk 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 :

1. Blok Mesin (*Engine Block*)



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

Blok silinder merupakan struktur utama mesin yang berfungsi sebagai rumah bagi semua komponen internal mesin. Komponen ini dibuat dari besi tuang berkualitas tinggi yang mampu menahan tekanan dan suhu tinggi dari proses pembakaran. Di dalam blok silinder terdapat ruang-

ruang silinder tempat piston bergerak melakukan siklus kerja. Kepala silinder terletak di bagian atas blok silinder dan berisi sistem katup yang mengatur aliran udara masuk dan gas buang keluar dari ruang pembakaran (Taylor, 2008).

2. Kepala silinder (*Cylinder head*).



Gambar 2.5 Kepala Silinder (Arik H. 09 : 2014)

Adalah salah satu komponen utama mesin yang dipasangkan pada blok silinder dan diikat menggunakan baut menutup satu ujung silinder dan sering berisikan katup tempat udara dan bahan bakar diisikan dan gas buang dikeluarkan. Kepala silinder harus tahan terhadap temperatur 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 di Banding dengan yang terbuat dari besi tuang. (Ir. Bambang Priambodo, 1995), Operasi Dan Pemeliharaan Mesin Diesel).

Cylinder head menahan tekanan pembakaran, mengendalikan panas dalam ruangan (dengan system pendinginan) mekanisme penyemprotan bahan bakar.

Cylinder head membutuhkan beberapa syarat antara lain sebagai berikut :

1. Dapat menahan tekanan pembakaran dan konsentrasi panas.
2. Mempunyai efek pendinginan yang tinggi.

3. Piston (*Torak*)

Ujung lain dari ruang kerja silinder ditutup oleh *torak* yang meneruskan kepada poros daya yang ditimbulkan oleh pembakaran bahan bakar. Cincin *torak* (*piston ring*) yang dilumasi dengan minyak mesin menghasilkan sil (*seal*) rapat gas antara torak dan lapisan silinder. Jarak perjalanan *torak* dari ujung silinder ke ujung yang lain disebut langkah atau *stroke*.



Gambar 2.6 Piston (Arik H. 09 : 2014)

4. *Piston Rod* (Batang Penghubung antara piston dan Crosshead)

Piston rod adalah batang yang menghubungkan piston dengan *crosshead*. Komponen ini bertugas mentransmisikan gaya dari piston ke *crosshead* dan harus mampu menahan beban yang besar dari proses pembakaran. Pada mesin induk kapal, *piston rod* memiliki diameter yang besar dan memerlukan pelumasan khusus untuk bearing *crosshead*.



Gambar 2.7 *Piston Rod* (Batang Penghubung *Crosshead* ke Piston) (P.T WSI)

5. *Crosshead*

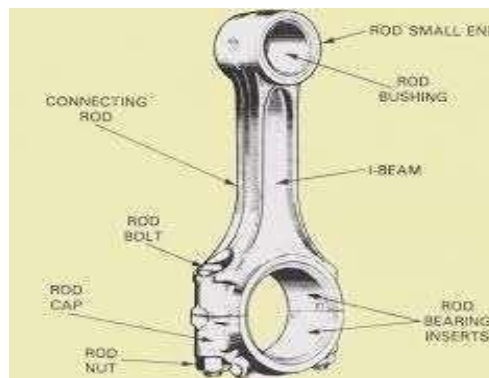
Crosshead adalah komponen utama yang berfungsi sebagai penghubung antara *piston rod* dan *connecting rod*. Komponen ini mengubah gerakan naik turun piston menjadi gerakan yang dapat diteruskan ke *crankshaft*. Pada mesin induk kapal, *crosshead* memiliki *bearing* yang memungkinkan gerakan dengan gesekan minimal dan memerlukan sistem pelumasan yang sangat baik untuk mencegah kerusakan.



Gambar 2.8 Sistem *Crosshead* (P.T Waruna Shipyard Indonesia)

6. *Connecting Rod* (Batang Penghubung)

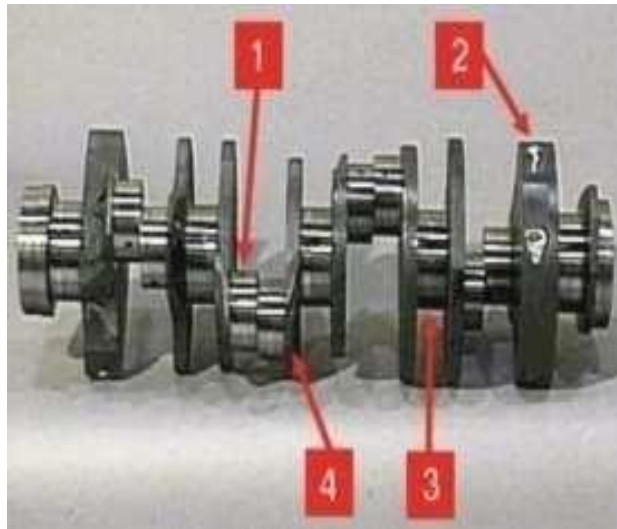
Satu ujung, yang disebut ujung kecil dari batang engkol, dipasang pada pena pergelangan atau pena *torak* yang terletak di dalam *torak*. Ujung besar mempunyai bantalan untuk pen engkol. Batang engkol mengubah dan meneruskan gerak bolak balik (*reciprocating*) dari torak menjadi putaran *continue* pena engkol selama langkah kerja dan sebaliknya selama langkah yang lain.



Gambar 2.9 Batang Penghubung (Arik H. 09 : 2014)

7. Poros Engkol (*Crankshaft*)

Poros engkol berputar dibawah aksi torak melalui engkol dan pena engkol yang terletak diantara pipi engkol (*crankweb*), dan meneruskan daya dari torak kepada poros yang digerakkan. Bagian dari poros engkol yang di dukung oleh bantalan utama dan berputar didalamnya di sebut tap (*journal*).



Gambar 2.10 Poros Engkol (Arik H. 09 : 2014)

8. *Camshaft* (Poros Nok)

Yang digerakkan oleh poros engkol oleh penggerak rantai atau oleh roda gigi pengatur waktu mengoperasikan katup pemasukan dan katup buang melalui nok, pengikut nok, batang dorong dan lengan ayun. Pegas katup berfungsi menutup katup.



Gambar 2.11 *Camshaft* (Arik H. 09 : 201)

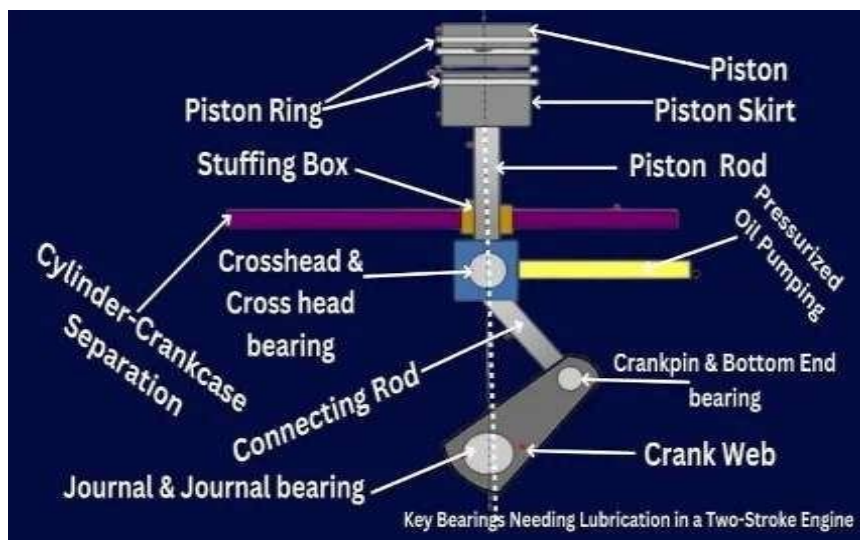
9. Roda Gila (*flywheel*)

Dengan berat yang cukup dikuncikan kepada poros engkol dan menyimpan energi kinetik selama langkah daya dan mengembalikannya selama langkah yang lain. Roda gila membantu menstart mesin dan juga bertugas membuat putaran poros engkol seragam.



Gambar 2.12 Roda Gila (Arik H. 09 : 2014)

2.2 Sistem *Crosshead*



Gambar 2.13 Sistem *Crosshead* Pada *Main Engine* (Mesin Induk Kapal) (Sham Yadav 2024)

Crosshead adalah komponen yang menghubungkan piston dengan *connecting rod* pada mesin diesel besar. Fungsi utama *crosshead* adalah mengubah gerakan translasi piston menjadi gerakan yang dapat diteruskan ke *connecting rod* untuk

memutar *crankshaft*. Sistem *crosshead* memungkinkan piston bergerak dalam garis lurus sempurna tanpa mengalami gaya samping yang dapat menyebabkan keausan dinding silinder (Heywood, 2018).

Crosshead bekerja dengan prinsip gerakan naik turun yang mengikuti pergerakan piston. Ketika terjadi pembakaran di ruang bakar, tekanan gas mendorong piston ke bawah, dan gerakan ini diteruskan melalui *crosshead pin* ke *connecting rod* yang kemudian memutar *crankshaft*. Sistem ini sangat efektif untuk mesin dengan *bore* besar dan tekanan pembakaran tinggi karena dapat mengurangi beban samping pada *liner silinder*.

Pada mesin diesel berukuran besar, sistem *crosshead* menjadi komponen yang sangat vital karena harus menahan beban yang sangat besar dari tekanan pembakaran. Beban ini harus didistribusikan dengan baik agar tidak menyebabkan kerusakan pada komponen lainnya. Sistem *crosshead* membantu menyebarkan beban ini secara merata ke seluruh struktur mesin (Watson, 2003).

2.3 Bearing Crosshead



Gambar 2. 14 *Bearing Crosshead* (PT.WSI)

Dalam sistem *crosshead* yang telah dijelaskan sebelumnya, *bearing crosshead* memegang peranan kritis sebagai komponen yang memungkinkan gerakan halus antara *crosshead pin* dengan *connecting rod*. *Bearing crosshead* merupakan komponen bantalan yang terletak pada sambungan antara *crosshead pin* dengan *connecting rod*, yang berfungsi mengurangi gesekan dan memfasilitasi transfer beban dari *crosshead* ke *connecting rod*. Mengingat beban dan tekanan tinggi yang dialami sistem *crosshead*, *bearing* ini harus mampu menahan beban

yang sangat besar dan berubah-ubah seiring dengan siklus kerja mesin.

Jenis *bearing crosshead* umumnya adalah *plain bearing* atau *journal bearing* yang terbuat dari material khusus. Material yang sering digunakan adalah perunggu timah putih (*white metal*) atau *alloy* khusus yang memiliki sifat tahan aus dan mampu menyerap beban kejut. *Bearing crosshead* dirancang untuk dapat diganti ketika mengalami keausan berlebihan tanpa harus membongkar seluruh mesin. Konstruksi *bearing* biasanya terdiri dari dua bagian (*split bearing*) untuk memudahkan pemasangan dan pemeliharaan (ASM International, 1997).

Penelitian Wibisana (2020) pada MV. Hijau Segar menunjukkan bahwa *bearing crosshead* memiliki karakteristik yang hampir sama dengan *journal bearing*, dimana kedua komponen ini sama-sama berfungsi sebagai bantalan luncur yang mengurangi gesekan dalam sistem mesin induk kapal.

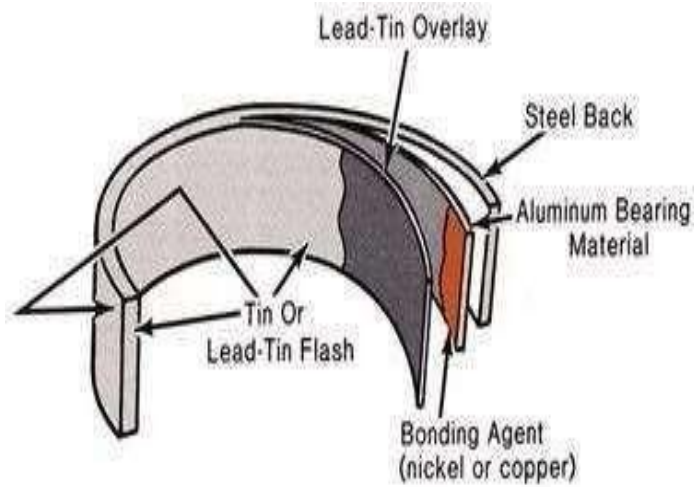
2.3.1 Fungsi *Bearing Crosshead*

Fungsi utama *bearing crosshead* adalah mengurangi gesekan antara *crosshead pin* dengan *connecting rod* saat mesin beroperasi. *Bearing* ini memungkinkan kedua komponen bergerak dengan lancar tanpa mengalami keausan yang berlebihan. Selain itu, *bearing crosshead* juga berfungsi mendistribusikan beban yang diterima dari *piston* ke *connecting rod* secara merata.

Bearing crosshead juga berperan dalam meredam getaran yang timbul dari proses pembakaran dan operasi mesin. Getaran yang tidak teredam dengan baik dapat menyebabkan kerusakan pada komponen lain dan mengganggu operasi mesin secara keseluruhan.

Fungsi lain yang tidak kalah penting adalah sebagai komponen yang dapat diganti saat perawatan. *Bearing crosshead* dirancang sebagai komponen yang dapat dilepas dan diganti tanpa harus membongkar seluruh sistem *crosshead*. Hal ini sangat membantu dalam proses perawatan dan mengurangi waktu berhenti kapal (Watson, 2003).

2.3.2 Konstruksi dan Material *Bearing Crosshead*



Gambar 2.15 konstruksi *bearing* (Tommy K, 2018)

Bearing crosshead umumnya terbuat dari material logam yang tahan aus seperti *bronze* atau *brass* dengan lapisan khusus. Konstruksi *bearing* dibuat dengan permukaan yang halus untuk mengurangi gesekan. Beberapa *bearing* dilengkapi dengan alur pelumasan yang berfungsi mendistribusikan oli ke seluruh permukaan *bearing*.

Material bearing modern sering menggunakan konstruksi dua lapis dimana bagian belakang terbuat dari baja yang kuat dan lapisan permukaan menggunakan material seperti *aluminium alloy* atau *white metal*. Kombinasi material ini memberikan kekuatan yang tinggi sekaligus sifat pelumasan yang baik (ASM International, 1997). Desain *bearing crosshead* juga mempertimbangkan faktor pemuaian *termal* dan pembentukan lapisan oli. Celah antara *bearing* dan *pin* harus dihitung dengan tepat untuk memastikan terbentuknya lapisan oli yang baik dalam berbagai kondisi operasi. Alur pada permukaan *bearing* dirancang untuk membantu distribusi pelumas yang merata.

Berdasarkan pengalaman di lapangan, Saputra & Wijaya (2023) menjelaskan bahwa beberapa bearing crosshead modern dilengkapi dengan sistem pemantauan untuk mengawasi kondisi *bearing* secara langsung. Sistem ini dapat mengukur parameter seperti suhu, getaran, dan tingkat keausan sehingga memungkinkan perawatan yang lebih tepat waktu dan akurat.

2.3.3 Cara Kerja *Bearing Crosshead*

Bearing crosshead bekerja dengan prinsip bantalan luncur dimana terjadi gerakan geser antara *crosshead pin* dengan *bearing*. Saat piston bergerak naik turun, *crosshead pin* akan bergerak bolak-balik di dalam *bearing*. Pelumasan yang baik sangat diperlukan untuk memastikan *bearing* dapat bekerja dengan optimal dan memiliki umur pakai yang panjang.

Proses kerja *bearing crosshead* dimulai dari pembentukan lapisan oli antara permukaan *bearing* dan *crosshead pin*. Lapisan oli ini berfungsi sebagai pemisah yang mencegah kontak langsung antara kedua permukaan logam. Ketebalan lapisan oli yang tepat sangat penting untuk menjamin operasi *bearing* yang baik. Selama operasi, *bearing crosshead* mengalami beban yang berubah-ubah sesuai dengan siklus kerja mesin. Beban terbesar terjadi saat langkah kerja dimana tekanan pembakaran mencapai puncaknya. *Bearing* harus mampu menahan beban yang berubah-ubah ini tanpa mengalami kerusakan (Heywood, 2018).

Distribusi beban pada *bearing crosshead* juga dipengaruhi oleh bentuk *bearing* dan kondisi permukaannya. *Bearing* yang mengalami keausan atau kerusakan akan menyebabkan distribusi beban yang tidak merata dan dapat mempercepat kerusakan komponen lainnya.

2.4 Gejala Awal Keausan *Bearing Crosshead*

Mengenalinya tanda-tanda awal keausan *bearing crosshead* sangat penting untuk perawatan mesin kapal. Deteksi dini membantu mencegah kerusakan besar yang bisa menyebabkan mesin berhenti total dan kapal tidak bisa beroperasi.

2.4.1 Gejala yang Bisa Dirasakan Saat Operasi

Getaran Mesin Meningkat Ketika *bearing crosshead* mulai rusak, mesin akan bergetar lebih kuat dari biasanya. Ini terjadi karena celah antara *crosshead pin* dan *bearing* menjadi lebih besar, sehingga gerakan mesin tidak stabil. Getaran ini biasanya mengikuti putaran mesin dan bisa dideteksi dengan alat pengukur getaran (Watson, 2003).

Suara Mesin Berubah Operator yang berpengalaman bisa mendengar perubahan suara mesin. *Bearing crosshead* yang mulai aus akan mengeluarkan suara ketukan atau bunyi logam yang berbeda dari suara normal. Suara ini semakin keras ketika mesin bekerja dengan beban berat (Heywood, 2018).

Tekanan dan Suhu Oli Tidak Stabil *Bearing* yang aus akan membuat tekanan oli turun karena oli bocor melalui celah yang membesar. Di sisi lain, gesekan yang bertambah bisa membuat suhu oli naik.

2.4.2 Gejala Pada Sistem Pelumas

Perubahan Kualitas Oli, Oli pelumas yang terkontaminasi partikel logam menunjukkan *bearing* sedang mengalami keausan. Analisis oli rutin bisa mendeteksi peningkatan kandungan logam seperti timah, tembaga, atau aluminium yang berasal dari bearing (ASM International, 1997).

Warna dan Tekstur Oli Berubah, Oli yang tadinya bersih bisa menjadi lebih gelap atau keruh karena tercampur dengan partikel aus dari *bearing*. Kekentalan oli juga bisa berubah akibat kontaminasi dan panas berlebihan.

Konsumsi Oli Meningkat, *Bearing* yang aus memiliki celah lebih besar, sehingga oli bisa bocor ke area lain. Akibatnya, level oli turun lebih cepat dari kondisi normal.

2.4.3 Gejala Suhu (*Thermal*)

Suhu di Area Bearing Naik, Keausan *bearing* menyebabkan gesekan bertambah, sehingga suhu di sekitar bearing crosshead meningkat. Hal ini bisa dideteksi menggunakan alat pengukur suhu infrared atau sensor suhu yang dipasang di dekat *bearing* (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Distribusi Suhu Tidak Merata, Jika keausan terjadi hanya di bagian tertentu, maka suhu di area tersebut akan lebih tinggi dibandingkan bagian lain. Perbedaan suhu ini bisa terlihat dengan kamera thermal.

Suhu Tidak Stabil, Bearing yang sehat akan menunjukkan suhu yang relatif stabil selama operasi. Bearing yang bermasalah akan menunjukkan naik-turun suhu yang tidak wajar.

2.5 Keausan (*Wear*)

Keausan adalah proses hilangnya material dari permukaan benda padat akibat aksi mekanis, yaitu kontak dan gerakan relatif terhadap benda padat, cair, atau gas lainnya. Keausan merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari pada setiap komponen yang bergerak dan saling berkontak. Tingkat keausan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti beban, kecepatan, material, dan kondisi lingkungan (Stachowiak & Batchelor, 2014).

2.5.1 Keausan *Adhesif*



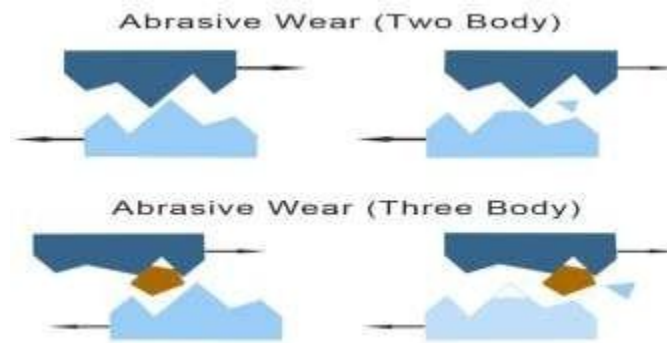
Gambar 2.16 Pengamatan *Micrographs* Keausan Gesek (Burwell,1957)

Keausan *adhesif* merupakan jenis keausan yang paling umum terjadi pada *bearing* dan komponen mesin yang bergerak. Keausan *adhesif* terjadi ketika dua permukaan logam berkontak langsung tanpa adanya lapisan pelumas yang memadai untuk memisahkan kedua permukaan tersebut. Dalam kondisi ini, permukaan logam akan saling menempel (*adhesion*) pada titik-titik kontak *mikroskopis* akibat gaya *van der Waals* dan ikatan metalik yang terbentuk secara spontan.

Proses keausan *adhesif* dimulai ketika *asperitas* (*tonjolan mikro*) pada kedua permukaan bertemu dan membentuk *junction* yang kuat. Ketika terjadi gerakan relatif, *junction* ini akan putus, namun tidak selalu pada *interface* asli. Material dari permukaan yang lebih lunak akan tertarik dan menempel pada permukaan yang lebih keras, menyebabkan transfer material dan pembentukan partikel aus. Pada *bearing crosshead* kapal, keausan *adhesif* umumnya terjadi dalam beberapa kondisi kritis. Pertama, saat *start-up* mesin ketika tekanan oli pelumas belum optimal dan lapisan *hidrodinamik* belum terbentuk sempurna. Kedua, saat terjadi kegagalan sistem pelumasan yang menyebabkan *boundary lubrication* atau *mixed lubrication*. Ketiga, saat mesin beroperasi dengan beban berlebih yang menyebabkan *breakdown* film pelumas (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Karakteristik visual keausan *adhesif* pada *bearing crosshead* dapat diidentifikasi melalui beberapa tanda. Permukaan *bearing* akan tampak kasar dengan tekstur yang tidak merata, adanya material transfer berupa bercak-bercak logam yang menempel, dan peningkatan suhu lokal yang dapat menyebabkan perubahan warna pada area tertentu.

2.5.2 Keausan Abrasif



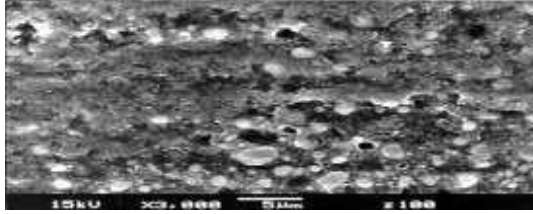
Gambar 2.17 Mekanis keausan *Abrasive* (Burwell,1957)

Keausan *abrasif* didefinisikan sebagai proses removal material yang terjadi ketika partikel keras bergesekan dengan permukaan yang lebih lunak, menyebabkan *displacement* atau *fracture* material dari permukaan tersebut. Jenis keausan ini sangat umum terjadi pada sistem *bearing* yang beroperasi dalam lingkungan yang mengandung kontaminan *abrasif*.

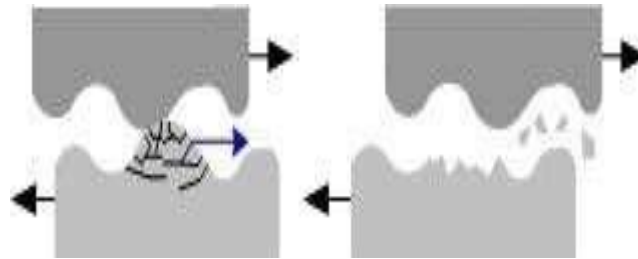
Keausan *abrasif* diklasifikasikan menjadi dua kategori utama berdasarkan mekanisme kontak. *Two-body abrasion* terjadi ketika partikel *abrasif* melekat pada satu permukaan dan mengikis permukaan lainnya, mirip dengan proses *grinding* atau *machining*. *Three-body abrasion* terjadi ketika partikel *abrasif* bergerak bebas di antara dua permukaan yang berkontak, seperti pasir yang terjepit di antara *bearing* dan *shaft*. Pada sistem *bearing crosshead* kapal, sumber partikel *abrasif* dapat berasal dari berbagai faktor. Kontaminasi eksternal seperti debu atmosfer, *salt spray*, atau partikel silika dapat masuk melalui sistem ventilasi atau *seal* yang tidak sempurna. Kontaminasi internal berupa partikel logam hasil keausan komponen lain seperti *piston ring*, *liner*, atau *gear* dapat terbawa oleh oli pelumas dan terakumulasi pada *bearing* (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Karakteristik keausan *abrasif* dapat diidentifikasi melalui pola goresan yang khas. Permukaan *bearing* akan menunjukkan *directional scratches* yang sejajar dengan arah gerakan *sliding*, *depth* yang relatif seragam tergantung ukuran partikel *abrasif*, dan *debris wear* yang berupa *curly chips* atau *angular particles*.

2.5.3 Keausan *Fatigue*



Gambar 2.18 menunjukkan mikroskopik suatu material karena keausan lelah (Burwell,1957)



Gambar 2.19 mekanisme keausan lelah (Burwell,1957)

Keausan *fatigue* merupakan proses kerusakan progresif yang terjadi akibat pembebanan *siklis* berulang yang menyebabkan inisiasi dan *propagasi* retakan pada material hingga terjadi *spalling* atau *pitting*. Jenis keausan ini sangat relevan untuk bearing crosshead yang mengalami siklus beban tinggi sesuai dengan siklus kerja mesin diesel.

Mekanisme keausan *fatigue* dimulai dari level mikrostruktur material bearing. Setiap siklus pembebanan menyebabkan stress dan *strain* pada material yang dapat mengakibatkan pergerakan dislokasi dan pembentukan *microcrack*. Retakan ini akan berkembang secara bertahap hingga mencapai panjang retakan kritis dan menyebabkan kegagalan *katastrofik*. Pada *bearing crosshead*, pembebanan *fatigue* terjadi dalam bentuk yang kompleks. Pembebanan primer berupa stress tekan akibat tekanan gas dalam silinder yang ditransmisikan melalui piston dan *crosshead*. Pembebanan sekunder berupa stress dinamis akibat gaya inersia dan getaran mesin. Stress *fluktuatif* ini menyebabkan tegangan dan kompresi bergantian pada material *bearing* yang dapat menghasilkan *crack fatigue* (ASM International, 1997).

Karakteristik visual keausan *fatigue* pada *bearing crosshead* dapat diidentifikasi melalui beberapa fitur yang khas. *Spalling* merupakan pembuangan material dalam bentuk serpihan atau potongan dengan bentuk tidak beraturan dan tepi tajam. *Pitting* terlihat sebagai kawah kecil atau cekungan yang tersebar pada permukaan penahan beban.

2.5.4 Keausan Korosi



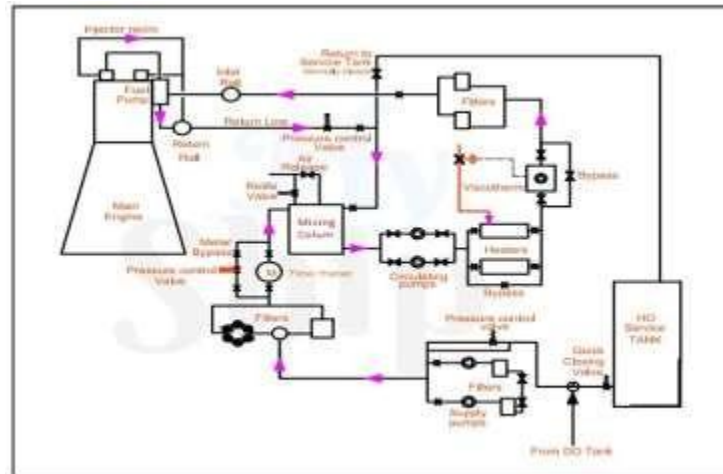
Gambar 2.20 Keausan *Korosif* Pada Baja (Burwell,1957)

Keausan korosi merupakan proses degradasi sinergis dimana keausan mekanis dan korosi kimia berlangsung secara *simultan* dan saling mempercepat, menghasilkan kehilangan material yang lebih besar dibandingkan jumlah kontribusi individual kedua proses tersebut. Fenomena ini sangat relevan untuk *bearing crosshead* yang beroperasi dalam lingkungan laut dengan paparan terhadap kelembaban dan agen *korosif*.

Mekanisme keausan korosi melibatkan interaksi kompleks antara korosi *elektrokimia* dan aksi mekanis. Proses korosi membentuk lapisan oksida atau produk korosi pada permukaan *bearing* yang umumnya lebih rapuh dan kurang menempel dibandingkan material dasar. Aksi mekanis berupa *sliding* atau *impact* akan menghancurkan lapisan pelindung ini, menyebabkan paparan permukaan logam segar yang lebih reaktif terhadap lingkungan *korosif*. Pada *bearing crosshead* kapal, sumber agen *korosif* sangat beragam. Sumber primer adalah kontaminasi kelembaban dalam oli pelumas yang dapat berasal dari kondensasi akibat *cycling* temperatur, *infiltrasi* melalui sistem *breather*, atau *blow-by* pembakaran yang mengandung uap air. Sumber sekunder adalah senyawa asam yang terbentuk dari produk pembakaran bahan bakar atau degradasi oli yang menghasilkan asam organik (Kumar & Singh, 2019).

Morfologi keausan korosi pada *bearing crosshead* menunjukkan karakteristik yang khas. Penampilan permukaan umumnya menunjukkan perubahan warna akibat produk korosi dengan warna yang bervariasi dari kuning-coklat hingga hijau. Korosi *pitting* terlihat sebagai serangan terlokalisasi dengan diameter kecil dan penetrasi yang relatif dalam.

2.6 Sistem Pelumasan Pada *Bearing Crosshead*



Gambar 2.21 Sistem Pelumasan Pada Mesin induk Kapal (marinesite)

Bearing crosshead dirancang dari segi kekuatan dan kemampuan menahan beban tinggi, namun tanpa pelumasan yang baik, *bearing* akan mengalami keausan berat dan memiliki umur yang sangat pendek, bahkan dapat mengalami kegagalan total dalam waktu singkat. Sistem pelumasan pada *bearing crosshead* merupakan sistem yang dirancang khusus untuk menyuplai pelumas ke area kontak antara *crosshead pin* dan *bearing* guna mencegah kontak langsung logam dengan logam dalam kondisi operasi yang unik dengan beban tinggi, gerakan bolak-balik, dan variasi beban ekstrem sesuai siklus kerja mesin diesel (Watson, 2003).

Pelumasan pada *bearing crosshead* bertujuan untuk mengurangi keausan permukaan dengan menurunkan gesekan antara *crosshead pin* dan bearing, mendinginkan permukaan dengan membawa pergi panas yang dibangkitkan oleh gesekan dan beban operasi, membersihkan permukaan dengan mencuci bersih butiran logam hasil keausan dan kontaminan, serta membentuk segel untuk menyekat ruangan yang berdampungan dengan *bearing crosshead* dari kontaminasi luar.

Permukaan *bearing crosshead* dan *crosshead pin* sebenarnya tidak rata melainkan terdiri atas titik yang tinggi dan rendah. Ketika *crosshead pin* meluncur di atas permukaan *bearing* dan suatu gaya menekannya, maka titik yang tinggi pada kedua permukaan akan saling mengunci dan menghambat gerak relatif. Hambatan untuk meluncur ini disebut gesekan dan pelepasan titik yang tinggi mengakibatkan aus. Pada *bearing crosshead*, kondisi ini menjadi lebih kompleks karena beban yang diterima sangat tinggi dan berubah-ubah sesuai siklus mesin. Gesekan pada *bearing crosshead* diukur dengan koefisien gesekan yang dinyatakan sebagai perbandingan gaya tangensial terhadap gaya tegak lurus. Pada *bearing crosshead* tanpa pelumasan, koefisien gesekan dapat mencapai 0,8-1,2 yang mengakibatkan pembentukan panas ekstrem dan keausan sangat cepat. Dengan pelumasan yang baik, koefisien gesekan dapat diturunkan hingga 0,01-0,05, mengurangi panas dan memperpanjang umur bearing secara signifikan. Sistem pelumasan *bearing crosshead* pada mesin diesel kapal dirancang untuk memastikan pasokan oli yang *kontinyu* dan terkontrol ke semua titik yang memerlukan pelumasan. Sistem tekanan terpusat merupakan konfigurasi yang paling umum digunakan dimana pompa oli utama mensuplai oli bertekanan ke seluruh sistem pelumasan mesin termasuk *bearing crosshead*. Tekanan oli umumnya dijaga pada rentang 3-6 bar untuk memastikan aliran yang memadai ke semua komponen. Komponen utama sistem pelumasan meliputi tangki oli (*sump*), pompa oli utama dan cadangan, filter oli multi-tahap, pendingin oli, katup pengatur tekanan, dan jaringan distribusi pipa. Sistem monitoring meliputi sensor tekanan oli, sensor temperatur, *flow meter*, dan alarm untuk kondisi abnormal. Setiap komponen dirancang dengan redundansi untuk memastikan keandalan sistem yang tinggi (Watson, 2003).

2.7 Penyebab Keausan *Bearing Crosshead*

Keausan *bearing crosshead* merupakan masalah kompleks yang disebabkan oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi. Pemahaman yang mendalam tentang penyebab-penyebab keausan ini sangat penting untuk mengembangkan strategi pencegahan yang efektif dan meningkatkan umur operasi *bearing crosshead* pada mesin diesel kapal.

2.7.1 Beban dan Tekanan Berlebih

Beban dan tekanan berlebih merupakan penyebab utama keausan *bearing crosshead* yang paling signifikan. Ketika mesin beroperasi dengan beban yang melebihi kapasitas desain, tekanan pada *bearing* akan meningkat secara drastis dan dapat mencapai nilai yang jauh melebihi batas aman material bearing. Kondisi *overload* ini dapat terjadi karena berbagai faktor seperti operasi kapal dengan muatan berlebih, penggunaan bahan bakar berkualitas rendah yang memerlukan tekanan pembakaran lebih tinggi, atau kondisi cuaca buruk yang memerlukan tenaga mesin maksimal dalam waktu lama.

Dampak beban berlebih terhadap *bearing crosshead* sangat serius dan progresif. Tekanan yang melebihi kapasitas desain akan menyebabkan *deformasi plastis* pada material *bearing*, terutama pada lapisan *bearing* yang lebih lunak. *Deformasi* ini akan mengubah geometri kontak dan menyebabkan distribusi beban yang tidak merata, menciptakan titik-titik konsentrasi tegangan yang menjadi inisiator keausan lebih lanjut (Kumar & Singh, 2019).

Operasi mesin dalam kondisi *overload* secara berkelanjutan akan mempercepat proses keausan *bearing* melalui beberapa mekanisme. Pertama, tekanan kontak yang tinggi akan meningkatkan *stress subsurface* yang mempercepat *inisiasi crack fatigue*. Kedua, pembentukan panas berlebih akibat *deformasi* dan gesekan akan mengubah sifat material *bearing* dan mengurangi kemampuannya menahan beban. Ketiga, kondisi operasi ekstrem akan mempercepat *degradasi* oli pelumas dan mengurangi efektivitas sistem pelumasan secara keseluruhan.

Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap beban berlebih meliputi kondisi operasi kapal yang tidak normal, setting mesin yang tidak tepat, dan kondisi *propeller* yang tidak optimal. Operasi kapal dalam kondisi *trim* yang tidak tepat atau dalam cuaca buruk dapat meningkatkan resistensi dan memerlukan tenaga mesin yang lebih besar. *Setting injection timing* yang tidak tepat atau tekanan pembakaran yang terlalu tinggi akan meningkatkan beban pada seluruh sistem *crosshead*. Kondisi *propeller* yang kotor atau rusak juga akan meningkatkan beban mesin secara keseluruhan (Watson, 2003).

2.7.2 Pelumasan yang Tidak Optimal

Pelumasan yang tidak optimal menjadi faktor kritis dalam keausan *bearing crosshead* karena pelumasan merupakan satu-satunya barrier yang mencegah kontak langsung antara permukaan logam yang bergerak. Sistem pelumasan yang baik harus mampu menyediakan lapisan oli yang cukup tebal untuk memisahkan permukaan *bearing*, membawa pergi panas yang timbul, dan membersihkan kontaminan dari area kontak.

Kekurangan oli pelumas merupakan kondisi yang paling berbahaya bagi *bearing crosshead*. Kondisi ini dapat terjadi karena kebocoran sistem pelumasan, kegagalan pompa oli, atau konsumsi oli yang berlebihan akibat kondisi operasi tertentu. Ketika *supply* oli tidak mencukupi, lapisan pelumas akan menipis atau bahkan hilang sama sekali, menyebabkan kontak langsung antara *crosshead pin* dan *bearing*.

Viskositas oli yang tidak sesuai spesifikasi juga merupakan penyebab serius keausan *bearing crosshead*. Oli dengan viskositas terlalu rendah tidak mampu membentuk lapisan pelumas yang cukup tebal untuk menahan beban tinggi yang dialami *bearing crosshead*. Sebaliknya, oli dengan viskositas terlalu tinggi akan menyebabkan hambatan berlebihan, pembentukan panas akibat *churning*, dan kesulitan dalam mengalir ke area yang memerlukan pelumasan (Watson, 2003).

Kontaminasi oli merupakan masalah serius yang dapat mempercepat keausan *bearing crosshead* melalui berbagai mekanisme. Kontaminasi partikel solid seperti debu, pasir, atau debris logam akan bertindak sebagai *abrasif* yang mengikis permukaan *bearing*. Kontaminasi air dalam oli akan mengurangi kemampuan pelumasan oli dan dapat menyebabkan korosi pada permukaan *bearing*.

2.7.3 Kualitas Material *Bearing*

Kualitas material *bearing* menentukan ketahanan terhadap keausan pada *bearing crosshead*. Material harus memiliki kombinasi sifat optimal: kekuatan mekanis untuk menahan beban, kekerasan untuk *resistensi* keausan, kemampuan konformasi untuk mengakomodasi *slight misalignment*, dan sifat *anti-seizure* untuk mencegah *welding* dengan *crosshead pin*.

Kekerasan material *bearing* harus berada dalam rentang yang tepat untuk aplikasi *bearing crosshead*. Material yang terlalu lunak akan mudah mengalami *deformasi* dan keausan *abrasif*, terutama ketika terdapat kontaminan partikel dalam oli pelumas. Sebaliknya, material yang terlalu keras akan kehilangan kemampuan *konformasi* dan *embeddability*, sehingga tidak dapat mengakomodasi *irregularitas* permukaan *crosshead pin* atau *embedded particles* (ASM International, 1997).

Struktur *mikroskopis* material *bearing* juga mempengaruhi ketahanan terhadap keausan. Struktur kristal yang tidak *homogen*, adanya *segregasi* unsur, atau distribusi fase yang tidak merata dapat menciptakan *weak spots* yang menjadi inisiator keausan. Proses *heat treatment* yang tidak tepat dapat menghasilkan struktur yang tidak optimal untuk aplikasi *bearing crosshead* dengan beban dinamis tinggi.

2.7.4 Kondisi Operasional Ekstrem

Kondisi operasional yang ekstrem merupakan faktor eksternal yang dapat secara signifikan mempercepat keausan *bearing crosshead*. Kondisi ini seringkali tidak dapat dihindari dalam operasi kapal komersial, namun pemahaman tentang dampaknya terhadap *bearing* dapat membantu dalam mengembangkan strategi *mitigasi* yang tepat.

Temperatur operasi yang tinggi memiliki dampak *multifaset* terhadap *bearing crosshead*. Peningkatan temperatur akan mengurangi viskositas oli pelumas, yang dapat menyebabkan penurunan ketebalan lapisan pelumas dan peningkatan kontak *asperity*. Temperatur tinggi juga akan mempercepat proses oksidasi oli, *thermal degradation additives*, dan pembentukan deposit. Kondisi lingkungan laut yang keras dengan paparan *salt spray*, kelembaban tinggi, dan *fluktuasi* temperatur yang ekstrem juga berkontribusi terhadap keausan *bearing crosshead*. Kontaminasi garam dapat menyebabkan korosi dan keausan korosi yang mempercepat *deteriorasi bearing*. Getaran dan *shock loading* akibat kondisi laut yang buruk dapat menyebabkan *impact wear* dan mempercepat *fatigue failure* (Kumar & Singh, 2019).

2.7.5 Faktor Desain dan Manufaktur

Faktor desain dan manufaktur *bearing crosshead* juga dapat berkontribusi

terhadap keausan prematur jika tidak dilakukan dengan benar. Desain *bearing* yang tidak optimal untuk kondisi operasi spesifik dapat menyebabkan *stress distribution* yang tidak merata, *inadequate lubrication*, atau *thermal management* yang buruk.

Toleransi manufaktur yang tidak tepat dapat menyebabkan berbagai masalah operasional. *Clearance* yang terlalu kecil akan menyebabkan *inadequate oil flow* dan pembentukan panas berlebih. *Clearance* yang terlalu besar akan menyebabkan *excessive leakage*, *noise*, dan *impact loading*. *Surface roughness* yang tidak sesuai spesifikasi dapat mempengaruhi pembentukan lapisan pelumas dan mempercepat *running-in wear*. *Geometric tolerances* seperti *roundness*, *straightness*, dan *concentricity* yang buruk akan menyebabkan *uneven load distribution* dan *edge loading* (Khonsari & Booser, 2017).

Quality control selama proses manufaktur juga sangat penting. *Inadequate bonding* antara *backing material* dan *bearing lining* dapat menyebabkan *delamination*. *Porosity* atau *voids* dalam *bearing material* dapat menjadi *crack initiation sites*. *Residual stress* dari proses manufaktur dapat berkombinasi dengan *operating stress* dan mempercepat *failure*. *Contamination* selama *manufacturing process* dapat meninggalkan *foreign materials* yang menjadi *abrasive* atau *stress concentrators*.

Pemahaman yang komprehensif tentang semua faktor penyebab keausan *bearing crosshead* ini sangat penting untuk mengembangkan strategi *maintenance* yang efektif, melakukan *proper material selection*, dan mengoptimalkan *operating procedures* untuk meminimalkan keausan dan memaksimalkan *bearing life*.

2.8 Analisis Keausan *Bearing Crosshead*

Analisis keausan *bearing crosshead* merupakan proses sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menentukan penyebab keausan yang terjadi pada *bearing crosshead*. Analisis ini sangat penting untuk memahami mekanisme keausan yang terjadi, menentukan tingkat kerusakan, dan mengembangkan strategi pencegahan yang tepat. Pada *bearing crosshead* kapal, analisis keausan menjadi lebih kompleks karena harus mempertimbangkan kondisi operasi yang berat dan lingkungan laut yang keras.

Tujuan utama analisis keausan *bearing crosshead* adalah untuk mengidentifikasi jenis keausan yang terjadi, menentukan penyebab utama keausan, mengevaluasi tingkat kerusakan, dan memberikan rekomendasi untuk pencegahan keausan di masa depan. Analisis yang tepat dapat membantu mengoptimalkan *interval* perawatan, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan keandalan mesin induk kapal.

Metode analisis keausan *bearing crosshead* dimulai dengan inspeksi visual yang merupakan langkah pertama dalam mengidentifikasi tanda-tanda keausan. Inspeksi visual dapat mengungkap perubahan warna permukaan bearing, adanya goresan atau *scoring*, pembentukan *pit* atau *spalling*, dan deformasi bentuk bearing. Setiap jenis keausan memiliki karakteristik visual yang khas: keausan *adhesif* menunjukkan material transfer dan *galling*, keausan *abrasif* menunjukkan goresan searah dengan gerakan, keausan kelelahan menunjukkan *pit* dan *spalling*, sedangkan keausan korosi menunjukkan perubahan warna dan pembentukan produk korosi.

Pengukuran dimensi *bearing crosshead* dilakukan untuk menentukan tingkat keausan secara *kuantitatif*. Pengukuran meliputi diameter dalam *bearing*, ketebalan dinding *bearing*, *ovality*, dan *taper* yang terjadi akibat keausan. Alat ukur yang digunakan harus memiliki akurasi tinggi seperti mikrometer, caliper, atau *coordinate measuring machine*. Data pengukuran dibandingkan dengan spesifikasi asli dan toleransi yang diperbolehkan untuk menentukan apakah *bearing* masih dapat digunakan atau harus diganti. Pengukuran harus dilakukan pada beberapa titik untuk mendapatkan gambaran distribusi keausan yang komprehensif.

Analisis pola keausan memberikan informasi tentang penyebab keausan yang terjadi. Pola keausan yang merata menunjukkan operasi normal dengan umur pakai yang telah habis. Pola keausan yang tidak merata mengindikasikan adanya masalah seperti *misalignment*, beban berlebih, atau pelumasan yang tidak optimal. Pola keausan berbentuk alur menunjukkan adanya kontaminasi *abrasif*, pola keausan berupa *pit* tersebar menunjukkan keausan kelelahan. Analisis pola keausan dikombinasikan dengan riwayat operasi dan pemeliharaan untuk mendapatkan kesimpulan yang akurat (Hutchings & Shipway, 2017).

Analisis *debris* dan kontaminan dalam oli pelumas dapat memberikan informasi tambahan tentang kondisi *bearing crosshead*. Partikel aus yang ditemukan dalam oli dapat dianalisis untuk menentukan jenis material, ukuran, dan *morfologi* yang dapat mengindikasikan jenis keausan yang terjadi. Kontaminan seperti air, partikel *solid*, atau produk degradasi oli dapat mengkonfirmasi penyebab keausan yang telah diidentifikasi melalui inspeksi visual. Analisis oli secara berkala dapat memberikan *early warning* tentang kondisi *bearing* sebelum kerusakan menjadi parah.

Interpretasi hasil analisis keausan *bearing crosshead* memerlukan pemahaman yang komprehensif tentang kondisi operasi, riwayat pemeliharaan, dan karakteristik masing-masing jenis keausan. Hasil analisis harus dibandingkan dengan standar atau kriteria yang telah ditetapkan untuk menentukan tindakan yang harus diambil. *Analisis trend* keausan dari waktu ke waktu dapat membantu dalam perencanaan pemeliharaan prediktif dan optimasi *interval* perawatan. Dokumentasi yang baik dari hasil analisis sangat penting untuk pembelajaran dan perbaikan sistem pemeliharaan di masa depan.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di PT. Waruna Shipyards Indonesia tepatnya di *Workshop Engine* dan Kapal MT. Gas Laura .

3.1.2 Waktu Penelitian

Tabel 3.1 Waktu Penelitian

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

3.2 Bahan dan Alat

Berikut merupakan bahan dan alat yang digunakan pada penelitian analisa penyebab terjadinya keausan pada Bearing Crosshead Kapal MT. Gas Laura.

3.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam Proses Penelitian ini adalah:

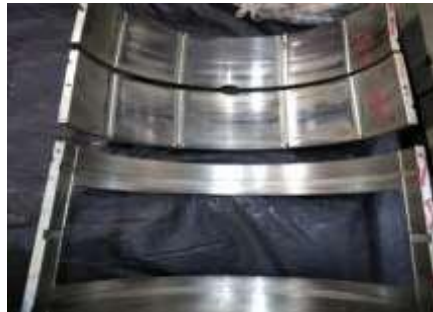
1. Data Primer yang digunakan adalah mencatat keterangan secara langsung dari mekanik dan kru kapal tentang objek yang diteliti, yaitu terhadap permasalahan yang terjadi pada *Bearing crosshead* di kapal MT. Gas Laura.
2. Data sekunder yang digunakan adalah data yang didapatkan secara tidak langsung, yaitu melalui buku-buku manual book yang membahas tentang *bearing crosshead* yang akan diteliti.

3.2.2 Alat Penelitian

Adapun Alat yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah:

1) *Bearing Crosshead*

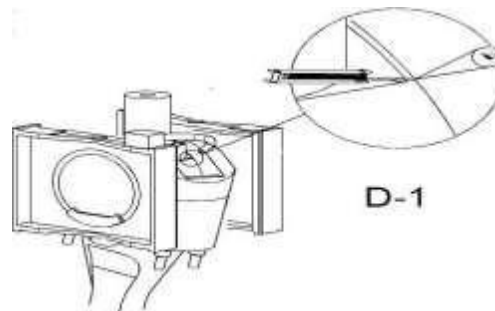
Berfungsi sebagai bantalan yang menjadi tumpuan utama dari komponen *crosshead* (kepala silang) pada mesin—khususnya mesin diesel 2 langkah besar seperti yang digunakan pada kapal laut guna menopang dan meminimalkan gesekan antara *crosshead* dengan bagian-bagian lain, sambil menyokong beban gaya yang dihasilkan dari gerak bolak-balik piston dan meneruskannya ke *connecting rod* (batang penghubung) sebelum akhirnya diarahkan ke *crankshaft* (poros engkol).



Gambar 3.1 *Bearing Crosshead* (PT.WSI)

2) *Crosshead*

Crosshead berfungsi sebagai penghubung antara *piston rod* dan *connecting rod* yang bertugas mengubah gerakan bolak-balik piston menjadi gerakan melingkar sambil memandu gerakan piston agar tetap lurus dan stabil, mencegah keausan pada *cylinder liner*, serta memastikan transfer tenaga yang efisien dari piston ke *crankshaft*, terutama pada mesin diesel besar, kompresor, dan pompa *reciprocating*.



Gambar 3.2 *Crosshead* (Anil Samotra 2021)

3) Pompa *Jack Pump*

Pompa juga dapat digunakan pada proses-proses yang membutuhkan tekanan *hidraulik* yang besar. Hal ini bisa dijumpai dalam proses pembukaan komponen bearing yang memerlukan kapasitas 750 bar untuk proses membuka dan mengencangkan baut *studball*.



Gambar 3.3 *Jack Pump* (PT. Waruna shipyard indonesia)

4) Selang *Jack Pump*

Sebagai penyambung antara *jack pump* dengan *glend* dan tempat pengantar fluida minyak dan angin.



Gambar 3.4 selang *Jack Pump* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

5) *Glend Jack Pump*

Adalah *specialis tools* pada mesin induk kapal yang digunakan untuk mengencangkan dan membuka baut *bearing crosshead* dengan cara kerja

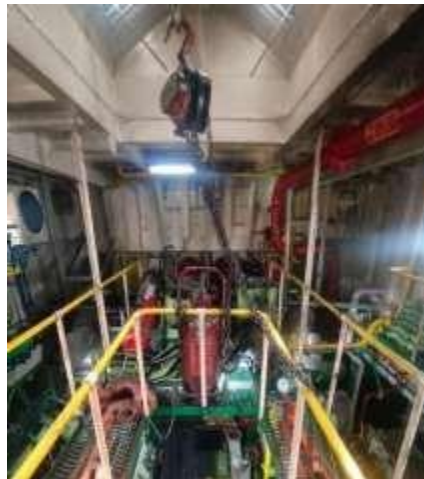
sebagai penerima tekanan angin dan oli dengan cara menekan baut baik digunakan untuk membuka baut atau pun mengencangkan kembali.



Gambar 3.5 *Glend Jack Pump* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

6) *Chain Block* (Takal)

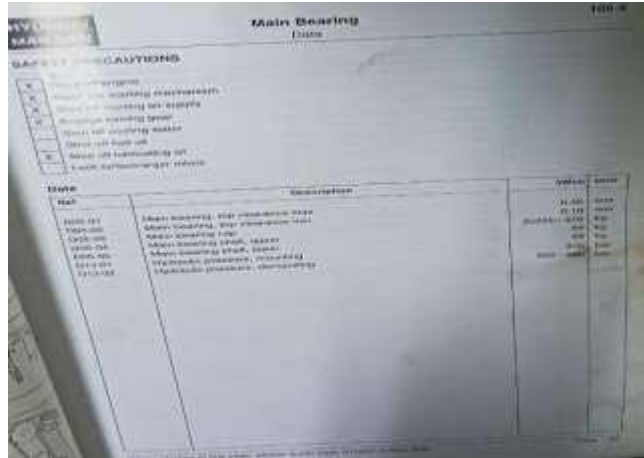
Takal atau *pulley* adalah roda beralur yang digunakan untuk mengubah arah atau mengurangi gaya yang diperlukan untuk mengangkat beban. Takal sering digunakan dalam sistem pengangkatan di industri perkapalan, konstruksi, dan manufaktur.



Gambar 3.6 Takal (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

7) *Manual Book* Mesin Induk

Manual book berfungsi sebagai bahan panduan dalam tahap prosedur pembongkaran mesin induk.



Gambar 3.7 *Manual Book* (PT. Waruna Shipyard Indonesia)

8) *Locis (Liner and Ovality Clearance Indicator System)*

Benang *locis* (*lead wire/plastic gauge*) pada *bearing crosshead* berfungsi untuk mengukur *clearance* atau celah antara *crosshead* dan *bearing* dengan cara meletakkan benang tipis pada permukaan *bearing*, memasang *crosshead* hingga menekan benang tersebut, kemudian mengukur ketebalan benang yang tertekan menggunakan skala khusus untuk menentukan besarnya *clearance*, sehingga teknisi dapat mengecek tingkat keausan *bearing* dengan membandingkan *clearance* hasil pengukuran terhadap spesifikasi standar pabrik, dimana *clearance* yang melebihi batas maksimum menunjukkan bearing telah aus dan perlu diganti untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.



Gambar 3.8 Benang Locis (Segelplastik)

9) Mikrometer

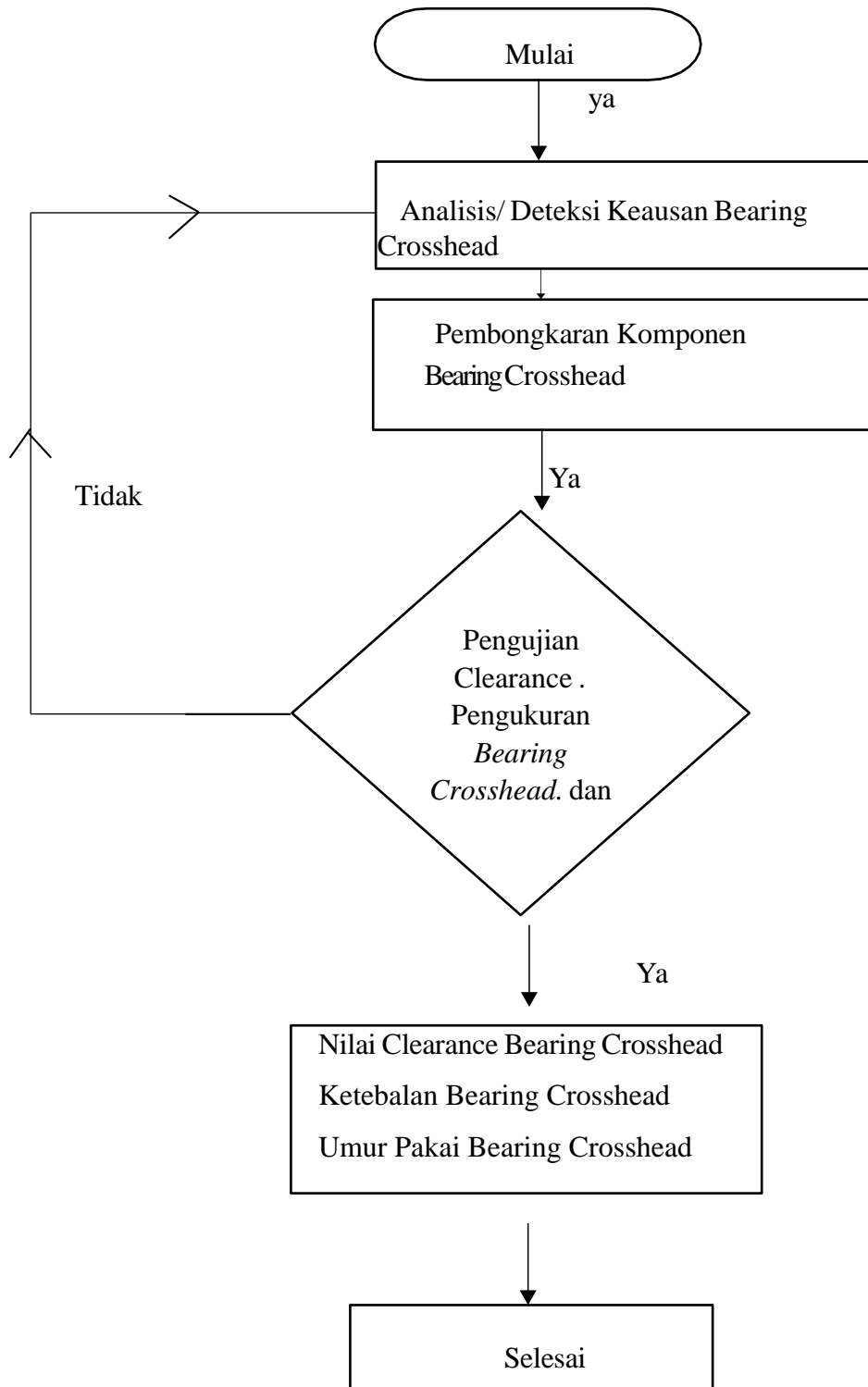
Mengukur benda-benda berukuran kecil/tipis, atau yang berbentuk pelat dengan tingkat presisi yang cukup tinggi. Mikrometer sekrup memiliki ketelitian 0,01 mm. Pada penelitian ini *micrometer* digunakan untuk mengukur *tebal bearing* Crosshead dan *Locis*.



Gambar 3.9 Mikrometer (PT.Waruna shipyard indonesia)

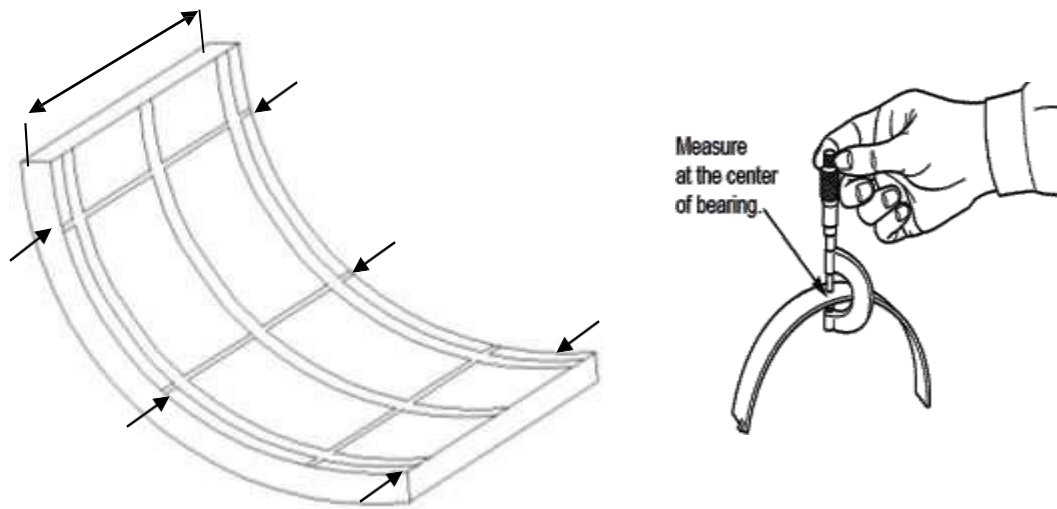
3.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ini dapat dilihat gambar dibawah ini:

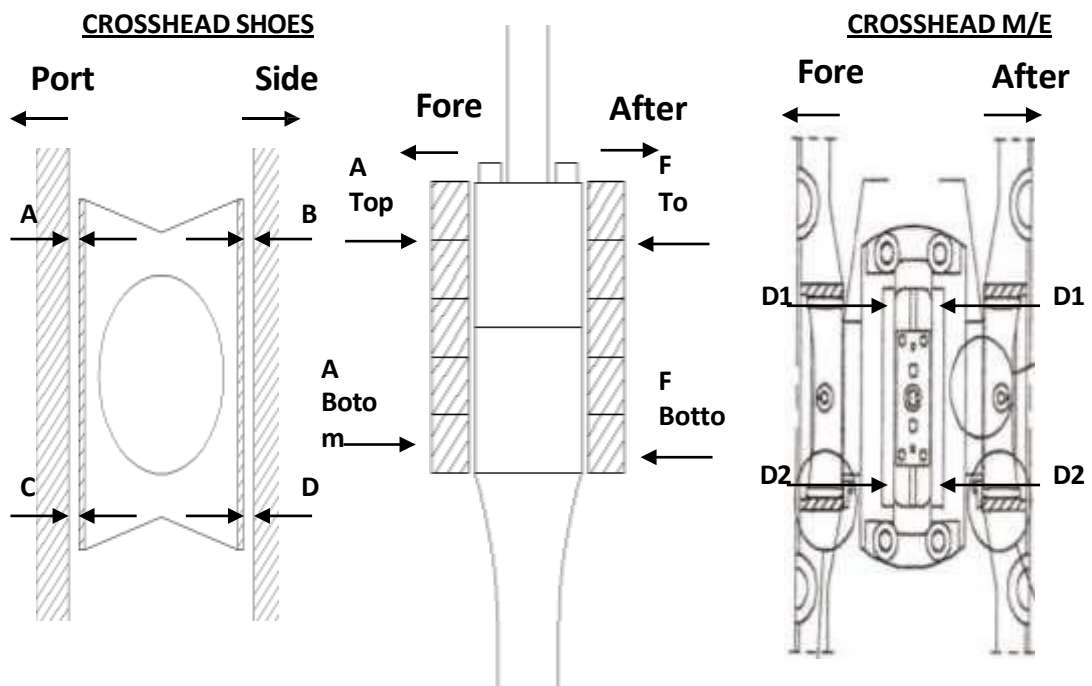


Gambar 3.10 Bagan Alir Penelitian

3.4 Rancangan Pengukuran Penelitian



Gambar 3.11 Rancangan *Bearing Crosshead* dan Pengukuran Dengan *Micrometer*



Gambar 3.12 Rancangan Pengujian *Clearance* dengan Benang *Locis* (*Liner and Ovality Clearance Indicator System*)

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 crosshead* yang akan dijadikan sebagai dasar referensi dalam penelitian ini.
2. Pembongkaran komponen bearing crosshead dan pengecekan visual maupun non-visual bersama operator lapangan untuk memastikan kondisi awal komponen sebelum pengukuran.
3. Pengecekan dan pengukuran *clearance* menggunakan benang locis untuk mengidentifikasi bearing yang rusak sebelum dan sesudah perbaikan serta mengetahui tingkat keausan.
4. Pengukuran keausan bearing crosshead pada dua posisi: a. Posisi upper (atas) b. Posisi lower (bawah)
5. melakukan penulisan data keausan Bearing pada mesin induk hasil dari pengukuran secara langsung untuk menentukan nilai yang efektif sebagai referensi pada mesin induk.
6. mengidentifikasi penyebab kerusakan pada bearing crosshead pada mesin induk dengan hasil pengolahan pengukuran keausan pada mesin.

Berikut rangkuman log sheet operator dan data pengukuran pada gambar 3.13 merupakan hasil data penelitian secara langsung di PT. Waruna Shipyard Indonesia :

No. Pengukuran	Posisi	Nilai	Kondisi	Catatan
1	Upper	0.15	Normal	
2	Lower	0.12	Normal	
3	Upper	0.18	Normal	
4	Lower	0.14	Normal	
5	Upper	0.16	Normal	
6	Lower	0.13	Normal	
7	Upper	0.17	Normal	
8	Lower	0.15	Normal	
9	Upper	0.19	Normal	
10	Lower	0.16	Normal	

Gambar 3.13 Data Ukur *Bearing crosshead*
(PT. Waruna Shipard Indonesia)

3.6 Pembongkaran Komponen *Bearing Crosshead*

Langkah-langkah proses pembongkaran komponen main bearing adalah sebagai berikut :

1. Keselamatan Kerja (*Safety Preparation*)

Sebelum memulai pekerjaan, pastikan untuk menggunakan APD lengkap yang terdiri dari safety shoes, wearpack, safety helmet, safety glasses, dan sarung tangan kerja, kemudian lakukan isolasi mesin dengan memastikan mesin dalam kondisi mati total, laksanakan prosedur *LOTO* (*Lock Out Tag Out*), dan periksa tidak ada tekanan sisa pada sistem. Selanjutnya periksa area kerja dengan memastikan ventilasi ruang mesin memadai, mengecek kebersihan dan kerapihan area kerja, serta menyiapkan *emergency equipment* yang diperlukan untuk antisipasi keadaan darurat.

2. Persiapan Peralatan dan Material Siapkan peralatan utama yang terdiri dari kompresor dengan tekanan minimal 7 bar, jack pump hydraulic dengan kapasitas 750 bar, selang hydraulic beserta fitting, glend jack untuk stud pin bearing, katrol atau hoist dengan kapasitas 2 ton, ring ball dan sling baja. Sediakan juga peralatan pengukuran berupa plastigauge (benang locis), micrometer 0-25mm dan 25-50mm, tabel referensi clearance, dan penggaris atau straightedge untuk keperluan pengukuran presisi. Lengkapi dengan material pendukung seperti cleaner atau degreaser, kain lap bersih, wadah untuk menyimpan komponen kecil, dan plastic sheet untuk melindungi komponen dari kontaminasi.
3. Persiapkan dokumentasi yang diperlukan dengan menyiapkan logsheet pengukuran, kamera untuk dokumentasi kondisi bearing, marking pen untuk penandaan komponen, serta drawing atau manual referensi mesin yang akan menjadi acuan dalam pelaksanaan pekerjaan.
4. Pastikan proses pembongkaran dilakukan sesuai SOP dan selalu perhatikan safety yang berlaku pada PT. Waruna Shipyard Indonesia, serta lakukan briefing dengan tim kerja mengenai prosedur yang akan dilaksanakan dan potensi bahaya yang mungkin terjadi selama proses pembongkaran berlangsung.

5. Lakukan pemeriksaan awal clearance dengan tujuan menentukan apakah pembongkaran diperlukan, caranya dengan memasang plastigauge memanjang pada pin crosshead, kemudian pasang kulit bearing dengan hati-hati agar plastigauge tidak bergeser, lalu kencangkan baut secara menyilang dengan hand tight only. Setelah itu buka kembali kulit bearing dan ambil plastigauge, kemudian bandingkan dengan tabel referensi dimana kondisi normal berkisar 0.05-0.12 mm, perlu perhatian 0.13-0.18 mm, dan harus diganti jika lebih dari 0.18 mm.
6. Persiapan Jack Hydraulic Mulai dengan memeriksa tekanan kompresor yang harus minimal 7 bar, lalu test jack pump hingga mencapai 750 bar, dan pastikan selang serta fitting tidak mengalami kebocoran yang dapat membahayakan keselamatan kerja.
7. Pemasangan Glend Jack Lanjutkan dengan memasang glend jack pada stud pin bearing menggunakan pola menyilang untuk distribusi tekanan yang merata, dan pastikan glend terpasang dengan benar serta aman sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya.
8. Proses Pelongkaran Baut Naikkan tekanan jack secara bertahap hingga mencapai 750 bar, kemudian putar baut stud pin secara bergantian dan menyilang sambil menjaga tekanan tetap stabil selama proses pelongkaran, setelah baut kendor baru turunkan tekanan jack perlahan-lahan.
9. Pengangkatan Bearing, Lepas glend jack dan baut stud pin, lalu gunakan katrol untuk mengangkat kulit bearing dengan hati-hati untuk menghindari kerusakan permukaan, kemudian tempatkan bearing pada area yang telah disiapkan sebelumnya.
10. Finalisasi Pembongkaran, Lakukan pengangkatan bearing crosshead menggunakan katrol dengan hati-hati untuk menghindari kerusakan pada permukaan komponen dan memastikan bearing terangkat dengan sempurna.
11. Setelah semua proses pembongkaran dilakukan, selanjutnya lakukan cleaning pada komponen bearing crosshead untuk mempersiapkan proses pengukuran yang akurat dan menghilangkan kontaminasi yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.

Persiapan Dokumentasi, Siapkan logsheet dan marking untuk mencatat hasil pengukuran serta menandai komponen bearing crosshead agar dapat diidentifikasi dengan jelas selama proses inspeksi dan untuk keperluan pemasangan kembali.

3.7 Langkah-langkah Pengukuran Keausan Pada Crosshead Bearing Pada Mesin Induk

1. Memastikan sebelum memasuki engine room pada kamar mesin agar selalu menggunakan safety yang lengkap yaitu safety shoes, safety helmet, wearpack, dan masker untuk menjaga keselamatan pekerja selama proses inspeksi berlangsung.
2. Melakukan pembongkaran pada komponen bearing crosshead di kapal induk dengan beberapa tahap yakni memastikan semua peralatan, specialist tools, jack, glend, kompresor dan peralatan penunjang lainnya sudah dalam kondisi aman dan siap untuk melakukan proses pembongkaran.
3. Pengukuran dilakukan pada bearing crosshead dengan 2 sisi yakni upper (atas) dan lower (bawah) untuk memastikan keausan dapat diketahui secara merata dan mendapatkan data yang akurat mengenai kondisi bearing.
4. Persiapan Kondisi Komponen Setelah komponen terbongkar, sebelum melakukan proses pengukuran pastikan dalam kondisi keadaan yang bersih dan siapkan logsheet sebagai media mencatat hasil pengukuran tersebut agar data yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan.
5. Persiapan Alat Ukur Pastikan alat-alat untuk melakukan pengukuran bearing crosshead sudah dalam keadaan yang baik, alat tersebut antara lain micrometer, meteran, plastigauge, dan peralatan pengukuran lainnya yang diperlukan untuk memastikan akurasi hasil pengukuran.

3.8 Variabel Penelitian

1. Data pengukuran keausan bearing crosshead mesin induk.
2. Menentukan metode pergantian bearing crosshead dengan pertimbangan hasil ukuran bearing crosshead dan hasil pengecekan clearance sebelum

dan sesudah perbaikan

3. Menganalisis penyebab keausan bearing crosshead pada mesin induk

3.9 Pengumpulan Data

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

3.10 Pengolahan Data

Langkah-langkah pengolahan data dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu :

1. Pengolahan terkait kajian kerusakan dan pengukuran keausan metal main bearing pada mesin induk dikapal MT. Gas Laura.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Melakukan Pengukuran Clearance Pada Bearing Crosshead.

Pengujian clearance bearing crosshead adalah prosedur pemeriksaan untuk mengukur celah atau jarak bebas antara bearing crosshead (bantalan pada penghubung piston dengan connecting rod mesin induk kapal) dengan komponen yang bergerak di dalamnya menggunakan metode benang locis, dimana benang locis (kawat timbal lunak) dipasang pada permukaan bearing, kemudian bearing ditutup dan crosshead digerakkan satu putaran penuh agar benang locis tertekan dan pipih sesuai besarnya clearance, lalu bearing dibuka kembali dan ketebalan benang locis yang telah pipih diukur menggunakan mikrometer untuk mengetahui besarnya clearance.

Pada penelitian ini dilakukan pada cylinder nomor 1, 3 dan 5 dengan mengukur clearance pada bearing crosshead cylinder nomor 1, 3 dan 5 menggunakan benang locis yang ditempelkan ke pin crosshead menggunakan grease (pelumas kental) sebagai perekat agar benang locis dapat menempel dengan baik pada permukaan pin crosshead selama proses pengukuran.



Gambar 4.1 Pengukuran Clearance Bearing Crosshead (PT. WSI)

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran *Clearance Crosshead Bearing* (PT. WSI)

Journal Position		<i>Clearance Crosshead Cylinder</i>			Keterangan	Standart Top Clearance in Crosshead Bearing
		1	3	5		
Fore	U-X	0,46	0,14	0,28	• Cylinder No : 1 Clearance terlalu besar	Max : 0,34 mm Min : 0,16 mm
	T-B	0,48	0,12	0,42		
	U-Y	0,45	0,15	0,11		
After	U-X	0,47	0,13	0,30	• Cylinder No : 3 Clearance terlalu kecil • Cylinder No : 5 Clearance tidak rata	
	T-B	0,49	0,11	0,44		
	U-Y	0,46	0,14	0,09		

Dari hasil pengukuran clearance bearing crosshead diatas keadaan pada cylinder nomor 1, 3, dan 5 menunjukkan kondisi abnormal dimana cylinder nomor 1 mengalami clearance terlalu besar, cylinder nomor 3 mengalami clearance terlalu kecil, dan cylinder nomor 5 mengalami clearance tidak rata pada posisi jurnal bagian depan (fore) maupun bagian belakang (after) bearing dengan titik pengukuran bagian atas depan (U-X), bagian atas-bawah (T-B), dan bagian atas belakang (U-Y) yang semuanya menunjukkan nilai clearance sudah melewati batas yang diizinkan sehingga diindikasikan bearing crosshead mengalami masalah keausan.

pengukuran clearance ini bertujuan mengidentifikasi penyebab terjadinya keausan pada bearing crosshead mesin induk kapal dengan cara:

- 1) mendeteksi clearance terlalu besar yang menandakan bearing crosshead sudah aus karena gesekan berlebihan dan oli pelumas tidak bisa bekerja dengan baik sehingga bearing cepat rusak.
- 2) mendeteksi clearance terlalu kecil yang menyebabkan bearing crosshead cepat panas dan aus karena kurang ruang untuk oli pelumas masuk dan melumasi permukaan bearing.
- 3) mendeteksi clearance tidak sama rata yang menunjukkan bearing crosshead aus tidak merata akibat posisi pemasangan miring atau bengkok

sehingga sebagian bearing lebih cepat aus dibanding bagian lainnya.

Maka dari hal tersebut harus dilaksanakan pembongkaran pada komponen bearing crosshead cylinder nomor 1, 3, dan 5 untuk selanjutnya dilakukan pengukuran dimensi dan pengecekan visual pada bearing crosshead agar dapat mengetahui penyebab keausan pada metal bearing crosshead dan menentukan tindakan perbaikan yang tepat untuk mencegah bearing crosshead mesin induk kapal rusak lebih parah.

4.2 Langkah – langkah pembongkaran bearing crosshead pada mesin.

- a. Persiapan dan Pemasangan Peralatan Memasang peralatan dan special tools sesuai SOP yang berlaku kemudian memberikan tekanan angin pada hydraulic jack sebesar 8 bar untuk mendukung komponen dan dilanjutkan dengan membuka baut pengikat bearing crosshead cap menggunakan hydraulic tensioner dengan tekanan sebesar 1500 bar untuk pembukaan pertama kali bearing crosshead secara bertahap dan merata untuk menghindari deformasi pada bearing cap.



Gambar 4.2 Pompa jack dan Spesial Tools Crosshead (PT.WSI)

- b. Pengangkatan Bearing Cap, Mengangkat cap bearing crosshead dengan menggunakan katrol berkapasitas 1 ton sesuai SOP yang ada dengan memperhatikan keselamatan kerja untuk mengangkat bearing shell (metal bearing crosshead) bagian atas dengan hati-hati dan memastikan tidak ada komponen yang terjatuh atau rusak selama proses pengangkatan berlangsung.



Gambar 4.3 Proses pengangkatan Cap Bearing Crosshead (PT.WSI)

c. Proses Cleaning dan Pengukuran Bearing



Gambar 4. 4 Proses Cleaning Bearing dan Pengukuran (PT.WSI)

d. Pembongkaran Bearing Lower, Selanjutnya dilakukan proses pembongkaran bearing crosshead bagian bawah (lower bearing) dengan mengangkat bearing shell bagian bawah dari housing crosshead kemudian membersihkan area bearing dari sisa oli dan kotoran serta melakukan inspeksi visual awal untuk melihat kondisi bearing dan pin crosshead.



Gambar 4.5 Proses Pembongkaran Lower Bearing Crosshead (PT.WSI)

- e. Pembongkaran Pin Crosshead Melepas pengikat pin crosshead pada kedua sisi menggunakan special tools dan hydraulic puller jika diperlukan untuk melepas pin yang macet kemudian mengangkat pin crosshead dari housing dengan bantuan crane atau hydraulic jack sambil memastikan pin tidak bengkok atau rusak selama proses pembongkaran berlangsung.



Gambar 4.6 Proses pelepasan pengikat Pin Crosshead dan Pengangkatan Pin Crosshead (PT.WSI)

- f. Pengukuran Clearance Menggunakan Benang Locis Melakukan pengukuran clearance bearing crosshead menggunakan benang locis (kawat timbal lunak) yang ditempelkan pada pin crosshead dengan grease sebagai perekat kemudian memberikan tekanan sebesar 900 bar untuk menekan benang locis hingga pipih sesuai dengan besarnya clearance lalu mengukur ketebalan benang locis yang telah pipih menggunakan

mikrometer untuk mengetahui nilai clearance bearing crosshead pada posisi jurnal bagian depan (fore) dan belakang (after) dengan titik pengukuran bagian atas depan (U-X), bagian atas-bawah (T-B), dan bagian atas belakang (U-Y) sesuai standar prosedur pengukuran.



Gambar 4.7 Pengukuran Clearance Bearing Crosshead (PT.WSI)

4.3 Pengukuran pada bearing crosshead.



Gambar 4.8 Pengukuran Ketebalan Bearing Crosshead (PT.WSI)

Setelah selesai membongkar bearing crosshead pada cylinder nomor 1, 3, dan 5 di kapal MT. Gas Laura, maka dilakukan analisa mendalam untuk mengidentifikasi penyebab terjadinya keausan pada bearing crosshead dengan cara memeriksa kondisi fisik bearing crosshead dan mengukur tingkat keausan yang terjadi akibat berbagai faktor operasional mesin, dimana analisa dilakukan dengan mengukur ketebalan bearing crosshead menggunakan mikrometer untuk membandingkan dengan ukuran standar pabrik, melakukan pemeriksaan visual untuk melihat pola keausan seperti aus merata, aus setempat, atau goresan yang

menunjukkan penyebab keausan berbeda-beda, serta menganalisa hubungan antara hasil pengukuran clearance sebelumnya dengan kondisi bearing yang ditemukan, yaitu pada cylinder nomor 1 dengan clearance terlalu besar disebabkan oleh keausan berlebihan akibat pelumasan tidak optimal atau getaran berlebihan, cylinder nomor 3 dengan clearance terlalu kecil disebabkan oleh pemasangan yang terlalu ketat atau ekspansi termal berlebihan, dan cylinder nomor 5 dengan clearance tidak sama rata disebabkan oleh misalignment atau deformasi komponen, sehingga dari hasil analisa ini dapat ditentukan akar penyebab keausan pada masing-masing bearing crosshead dan langkah pencegahan yang tepat untuk mengatasi masalah serupa di masa mendatang pada mesin induk kapal MT. Gas Laura.

Tabel 4.2 Data Umur Operasional Bearing Crosshead (PT. WSI)

Cylinder No	Standar Umur Pakai	Umur Pakai Aktual	Selisih	Status
1	2000 jam	2340 jam	+340 jam	Melebihi
3	2000 jam	1850 jam	-150 jam	Normal
5	2000 jam	2180 jam	+180 jam	Melebihi

Tabel 4.3 Data Pengukuran Bearing Crosshead (PT. WSI)

Crosshead Bearing		Position	Cylinder no1	Cylinder no3	Cylinder no5
Upper	a		11,62 mm	11,98 mm	11,88 mm
	b		11,60 mm	11,96 mm	11,79 mm
	c		11,63 mm	11,99 mm	11,90 mm
	a'		11,62 mm	11,98 mm	12,15 mm
	b'		11,60 mm	11,96 mm	12,18 mm
	c'		11,63 mm	11,99 mm	12,12 mm
	Lower	a		11,65 mm	11,97 mm
b			11,57 mm	11,95 mm	11,82 mm
c			11,64 mm	11,98 mm	11,92 mm
a'			11,65 mm	11,97 mm	12,15 mm
b'			11,57 mm	11,95 mm	12,18 mm
c'			11,64 mm	11,98 mm	12,12 mm
Standart			: 12 mm		
Umur pakai standar		: 2000 Jam			

Keterangan :

- Standart Bearing Crosshead : 12.00 mm (Pengukuran dilakukan dengan menggunakan micrometer)
- Posisi pengukuran bearing dilakukan pada 6 posisi yakni pada posisi kiri A, B, C dan sisi kanan A, B, C baik upper maupun lower
- Dari hasil pengukuran thickness (ketebalan) pada bearing dari ketiga cylinder pada tabel diatas telah berada dibawah standard berarti :

Hasil Pengukuran Ketebalan *Bearing: cylinder* No 1

- Upper bearing A kiri: 11,62 mm, A kanan: 11,62 mm
- Upper bearing B kiri: 11,60 mm, B kanan: 11,60 mm
- Upper bearing C kiri: 11,63 mm, C kanan: 11,63 mm
- Lower bearing A kiri: 11,65 mm, A kanan: 11,65 mm
- Lower bearing B kiri: 11,57 mm, B kanan: 11,57 mm
- Lower bearing C kiri: 11,64 mm, C kanan: 11,64 mm

Kesimpulan: Semua bearing mengalami keausan merata

Cylinder 1 sudah beroperasi 340 jam lebih lama dari standar. Ini menyebabkan Abrasive Wear (keausan akibat gesekan partikel keras):

Kondisi Ketebalan Bearing:

- Upper bearing: berkurang dari 12,00 mm menjadi 11,60-11,63 mm (berkurang 0,37-0,40 mm)
- Lower bearing: berkurang dari 12,00 mm menjadi 11,57-11,65 mm (berkurang 0,35-0,43 mm)

Kondisi Clearance:

- Fore (depan): 0,45-0,48 mm (standar maksimal 0,34 mm) → melebihi 0,11-0,14 mm
- After (belakang): 0,46-0,49 mm (standar maksimal 0,34 mm) → melebihi 0,12-0,15 mm

Penjelasan:

- Karena mesin dipakai 340 jam lebih lama, oli pelumas yang seharusnya diganti di jam ke-2000 terus digunakan hingga jam ke-2340
- Oli yang sudah kotor mengandung banyak partikel keras (serpihan logam, debu, kotoran) yang mengikis bearing seperti amplas

- Setiap 100 jam operasi tambahan, bearing terkikis sekitar 0,015 mm
- Dalam 340 jam lebih, bearing terkikis tambahan 0,05 mm, ditambah aus normal 2000 jam pertama sekitar 0,30-0,35 mm
- Total pengurangan ketebalan 0,35-0,43 mm menyebabkan clearance membesar dari 0,16-0,34 mm (standar) menjadi 0,45-0,49 mm

Keausan merata pada bearing crosshead cylinder 1 disebabkan oleh pelumasan tidak optimal karena oli pelumas kotor atau viskositas tidak sesuai, getaran berlebihan akibat ketidakseimbangan mesin, dan beban operasi berlebihan dalam jangka waktu lama sehingga bearing terus bergesekan dengan pin crosshead dan mengalami abrasi secara merata di seluruh permukaan bearing.

Hasil Pengukuran Ketebalan *Bearing*: *Cylinder No* : 3

- Upper bearing A kiri: 11,98 mm, A kanan: 11,98 mm
- Upper bearing B kiri: 11,96 mm, B kanan: 11,96 mm
- Upper bearing C kiri: 11,99 mm, C kanan: 11,99 mm
- Lower bearing A kiri: 11,97 mm, A kanan: 11,97 mm
- Lower bearing B kiri: 11,95 mm, B kanan: 11,95 mm
- Lower bearing C kiri: 11,98 mm, C kanan: 11,98 mm

Kesimpulan: Semua bearing mengalami sedikit keausan

Cylinder 3 baru beroperasi 1850 jam, masih di bawah standar 2000 jam.

Tapi mengalami Adhesive Wear (keausan akibat gesekan logam langsung):

Kondisi Ketebalan Bearing:

- Upper bearing: 11,96-11,99 mm (berkurang 0,01-0,04 mm dari standar 12,00 mm).
- Lower bearing: 11,95-11,98 mm (berkurang 0,02-0,05 mm dari standar 12,00 mm).

Kondisi Clearance:

- Fore (depan): 0,12-0,15 mm (standar minimal 0,16 mm) → kurang 0,01-0,04 mm
- After (belakang): 0,11-0,14 mm (standar minimal 0,16 mm) → kurang 0,02-0,05 mm

Penjelasan:

- Bearing hampir tidak aus (hanya berkurang 0,01-0,05 mm) karena umur

pakai masih normal.

- Tapi clearance terlalu kecil (0,11-0,15 mm, padahal minimal harus 0,16 mm).
- Ini terjadi karena kesalahan waktu pemasangan bearing baru sekitar 1850 jam yang lalu:
 - Bearing dipasang terlalu ketat.
 - Baut bearing cap dikencangkan terlalu kuat.
 - Atau bearing yang dipasang ukurannya terlalu tebal.
- Karena clearance terlalu sempit sejak awal, oli tidak bisa masuk dengan baik.
- Bearing dan pin bergesekan langsung (metal-to-metal) selama 1850 jam.
- Gesekan ini menghasilkan panas tinggi yang membuat bearing berubah warna kekuningan/kebiruan.

Kesimpulan: Kerusakan bukan karena umur pakai terlalu lama, tapi karena salah pasang

Clearance terlalu kecil pada bearing crosshead cylinder 3 disebabkan oleh bearing baru yang dipasang dengan ukuran oversize (lebih tebal dari standar), pemasangan bearing cap dengan torque berlebihan sehingga menekan bearing, atau kesalahan pemilihan bearing dengan kelas toleransi yang salah saat penggantian, sehingga meskipun bearing dalam kondisi baik namun clearance menjadi terlalu sempit untuk operasi normal.

Hasil Pengukuran Ketebalan *Bearing*: *Cylinder* No : 5

- Upper bearing A kiri: 11,88 mm, A kanan: 12,15 mm
- Upper bearing B kiri: 11,79 mm, B kanan: 12,18mm
- Upper bearing C kiri: 11,90 mm, C kanan: 12,12 mm
- Lower bearing A kiri: 11,85 mm, A kanan: 12,15 mm
- Lower bearing B kiri: 11,82 mm, B kanan: 12,18 mm
- Lower bearing C kiri: 11,92 mm, C kanan: 12,12 mm

Kesimpulan: Ketebalan bearing tidak merata

Cylinder 5 sudah beroperasi 180 jam lebih lama dari standar. Mengalami Corrosive Wear (keausan tidak merata akibat korosi):

Kondisi Ketebalan Bearing:

- Upper bearing sisi kiri: 11,79-11,90 mm (berkurang 0,10-0,21 mm)
- Upper bearing sisi kanan: 12,12-12,18 mm (bertambah 0,12-0,18 mm)
- Lower bearing sisi kiri: 11,82-11,92 mm (berkurang 0,08-0,18 mm)
- Lower bearing sisi kanan: 12,12-12,18 mm (bertambah 0,12-0,18 mm)

Kondisi Clearance:

- Fore U-X: 0,28-0,30 mm (mendekati batas maksimal 0,34 mm)
- Fore T-B: 0,42-0,44 mm (melebihi maksimal 0,34 mm sebesar 0,08-0,10 mm)
- Fore U-Y: 0,09-0,11 mm (kurang dari minimal 0,16 mm sebesar 0,05-0,07 mm)

Penjelasan:

- Bearing tidak aus merata: sisi kiri menipis 0,10-0,21 mm, sisi kanan malah tebal 0,12-0,18 mm
- Ini menyebabkan clearance tidak sama:
 - Posisi tengah (T-B) terlalu longgar 0,42-0,44 mm karena bearing paling tipis
 - Posisi kanan (U-Y) terlalu sempit 0,09-0,11 mm karena bearing paling tebal

Ketidakrataan ini terjadi karena:

1. Umur pakai berlebihan 180 jam → oli sudah kotor, mengandung air dan asam yang merusak bearing (korosi)
2. Pemasangan bearing miring → beban tidak merata, satu sisi tertekan lebih keras
3. Sisi yang tertekan keras → aus dan tipis (berkurang 0,10-0,21 mm)
4. Sisi yang kurang tertekan → tidak aus, bahkan mengembang karena panas (bertambah 0,12-0,18 mm)

Clearance tidak rata pada bearing crosshead cylinder 5 disebabkan oleh misalignment (ketidaklurusan) antara pin crosshead dengan housing bearing akibat deformasi komponen, ketidakrataan permukaan akibat machining yang tidak presisi, dan distribusi beban yang tidak merata sehingga sebagian bearing mengalami tekanan berlebihan (menyebabkan ekspansi) sedangkan sebagian lain mengalami gesekan berlebihan (menyebabkan keausan).

Tabel 4.4 Ringkasan Keausan Berdasarkan Umur Pakai

Cylinder	Umur Pakai	Pengurangan Ketebalan	Perubahan Clearance	Penyebab Utama
1	2340 jam (+340 jam)	Merata 0,35-0,43 mm	Membesar 0,11-0,15 mm	Umur pakai berlebihan → oli kotor → partikel mengikis bearing
3	1850 jam (normal)	Hampir tidak aus 0,01-0,05 mm	Mengecil 0,01-0,05 mm	Kesalahan pemasangan → clearance terlalu sempit → gesekan logam langsung
5	2180 jam (+180 jam)	Tidak merata 0,08-0,21 mm	Tidak rata 0,09-0,44 mm	Umur pakai berlebihan + pemasangan miring → korosi + beban tidak merata

- Cylinder 1: Semakin lama dipakai (melebihi 2000 jam), semakin banyak bearing terkikis, clearance semakin besar.
- Cylinder 3: Umur pakai masih normal, tapi rusak karena salah pasang sejak awal.
- Cylinder 5: Umur pakai berlebihan + pemasangan tidak lurus → kerusakan kombinasi (aus tidak merata).

Tabel 4.5 Visual Bearing Crosshead

No	Bearing crosshead	Type Kerusakan	Penyebab Kerusakan
1			Abrasive wear terutama disebabkan oleh kontaminasi partikel keras dalam oli pelumas, kondisi operasional yang tidak optimal, dan faktor mekanis seperti getaran berlebihan.
		Abrasive Wear	
3			dipicu oleh pelumasan yang tidak memadai, kondisi panas berlebihan, pemasangan yang tidak tepat, dan ketidakcocokan material atau kondisi permukaan.
		Adesif Wear	
5			terjadi akibat kontaminasi kimia dalam oli (asam, air), kondisi lingkungan korosif, faktor elektrokimia, dan kombinasi dengan tekanan mekanis yang tidak merata
		Korosif Wear	

Berdasarkan hasil pembongkaran, pengukuran, dan pengamatan visual, setelah melakukan pelepasan bearing crosshead dari cap-nya didapatkan bahwa bearing crosshead mengalami 3 macam kerusakan yaitu *Abrasive wear*, *Adhesive wear*, dan *Corrosive wear*. Pada *cylinder 1* dengan masalah clearance terlalu besar (0,45-0,49 mm melebihi batas maksimum 0,34 mm) yang disebabkan oleh ketebalan bearing crosshead berkurang merata dari standar 12,00 mm menjadi 11,57-11,65 mm (pengurangan 0,35-0,43 mm), kondisi visual menunjukkan abrasive wear berupa permukaan bearing yang tergores halus dan seragam dengan warna kusam akibat adanya partikel asing atau kotoran yang masuk ke sistem pelumasan sehingga mengikis permukaan bearing secara bertahap. Pada *cylinder 3* dengan masalah clearance terlalu kecil (0,11-0,15 mm di bawah batas minimum 0,16 mm) meskipun ketebalan bearing crosshead hampir tidak berubah dari standar 12,00 mm (hanya berkurang 0,01-0,05 mm menjadi 11,95-11,99 mm), kondisi visual menunjukkan adhesive wear berupa perubahan warna menjadi kekuningan hingga kebiruan dengan permukaan bergelombang dan bercak material yang menempel, hal ini disebabkan karena minyak lumas atau oil film yang kurang akibat clearance terlalu sempit sehingga menimbulkan kontak metal-to-metal yang menghasilkan kenaikan suhu yang tinggi dan menyebabkan perubahan warna pada permukaan bearing. Pada *cylinder 5* dengan masalah clearance tidak merata (bervariasi ekstrem 0,09-0,44 mm dengan perbedaan 0,35 mm antar posisi) yang disebabkan oleh ketebalan bearing crosshead tidak seragam dimana posisi kiri berkurang 0,08-0,21 mm sedangkan posisi kanan bertambah 0,12-0,18 mm dari standar 12,00 mm, kondisi visual menunjukkan corrosive wear berupa lubang-lubang kecil (pitting), perubahan warna kehitaman/kehijauan, dan endapan kimia pada permukaan bearing yang disebabkan oleh kontaminasi kimia dalam oli pelumas dikombinasikan dengan misalignment pemasangan bearing crosshead. Maka dari itu dilakukan penggantian metal bearing crosshead yang baru pada ketiga *cylinder* tersebut dengan spesifikasi yang tepat disertai perbaikan sistem pelumasan, penyetelan clearance, dan pemeriksaan alignment agar dapat mengembalikan performa mesin induk kapal.

4.4 Penanganan permasalahan keausan bearing crosshead.

Berdasarkan hasil pengujian clearance bearing crosshead menggunakan metode benang locis dan pengukuran ketebalan bearing yang telah dilakukan, ditemukan bahwa bearing crosshead pada cylinder 1, 3, dan 5 mengalami keausan dengan karakteristik yang berbeda-beda. Cylinder 1 menunjukkan clearance terlalu besar akibat abrasive wear yang disebabkan kontaminasi partikel keras dalam oli pelumas, cylinder 3 mengalami clearance terlalu kecil dengan adhesive wear akibat oil film yang tidak mencukupi dan kontak metal-to-metal, sedangkan cylinder 5 menunjukkan clearance tidak merata dengan corrosive wear akibat kontaminasi kimia dan misalignment pemasangan. Kondisi ketebalan bearing pada ketiga cylinder tersebut telah berada di luar standar operasional yang diizinkan sehingga mengindikasikan keausan yang signifikan.

Dari hasil pembongkaran dan pengecekan visual pada bearing crosshead ditemukan bahwa bearing mengalami tiga jenis keausan berbeda yaitu keausan abrasif yang ditandai permukaan tergores merata, keausan adhesif yang ditunjukkan perubahan warna kekuningan hingga kebiruan akibat panas berlebihan, dan keausan korosif yang terlihat dari adanya pitting dan perubahan warna kehitaman dengan ketebalan bearing yang sudah tidak sesuai standar value. Kondisi ini disebabkan oleh faktor-faktor seperti kontaminasi oli pelumas, clearance yang tidak sesuai, sistem pendingin tidak optimal, dan masalah alignment komponen yang mempengaruhi distribusi beban pada bearing crosshead.

Maka dari hal tersebut untuk mengembalikan performa mesin induk kapal menjadi optimal perlu dilaksanakan penggantian bearing crosshead yang baru pada ketiga cylinder bermasalah, pembersihan menyeluruh sistem pelumasan untuk menghilangkan kontaminan, penyetelan ulang clearance sesuai spesifikasi standar, perbaikan alignment komponen, peningkatan kualitas oli pelumas dengan aditif anti-korosi, serta implementasi program pemeliharaan preventif yang meliputi monitoring berkala terhadap clearance bearing, analisis oli rutin, dan perawatan sistem pendingin yang memadai untuk menjaga kondisi bearing crosshead dalam rentang operasional normal sehingga tidak terjadi kegagalan operasi pada mesin induk dan memperpanjang umur pakai komponen bearing

crosshead di masa mendatang.

4.5 Analisa Penyebab Keausan Bearing Crosshead.

Berdasarkan hasil pengujian clearance bearing crosshead menggunakan metode benang locis dan pengamatan visual setelah pembongkaran, ditemukan tiga jenis keausan berbeda pada cylinder 1, 3, dan 5 yang masing-masing disebabkan oleh faktor spesifik.

- A. Cylinder 1 mengalami abrasive wear dengan clearance terlalu besar akibat kontaminasi partikel keras seperti debu, pasir, dan serpihan logam dalam sistem pelumasan yang bertindak seperti amplas mengikis permukaan bearing secara merata, kondisi ini dipicu oleh sistem filtrasi oli yang tidak memadai, oli pelumas yang tidak diganti sesuai jadwal, dan kebocoran seal yang memungkinkan kontaminan eksternal masuk ke sistem bearing crosshead.
- B. Cylinder 3 mengalami adhesive wear dengan clearance terlalu kecil yang disebabkan oleh pelumasan tidak memadai akibat clearance bearing yang terlalu sempit sehingga oil film tidak dapat terbentuk dengan baik, kondisi ini mengakibatkan kontak langsung metal-to-metal antara bearing dan crosshead pin yang menimbulkan panas berlebihan dan transfer material antar permukaan. Penyebab utama adhesive wear ini adalah pemasangan bearing dengan toleransi yang salah, torque pemasangan bearing cap yang berlebihan, sistem pendingin oli yang tidak optimal, dan pemilihan grade oli pelumas yang tidak sesuai dengan kondisi operasional mesin.
- C. Cylinder 5 mengalami corrosive wear dengan clearance tidak merata yang disebabkan oleh kombinasi kontaminasi kimia dalam oli pelumas dan masalah alignment komponen bearing crosshead. Kontaminasi kimia berupa kandungan asam dari produk pembakaran, kontaminasi air dalam sistem pelumasan, dan degradasi aditif oli akibat overheating menciptakan lingkungan korosif yang merusak permukaan bearing secara tidak merata, sedangkan misalignment akibat deformasi komponen, ketidakrataan permukaan bearing seat, dan kesalahan prosedur pemasangan menyebabkan distribusi beban yang tidak seimbang sehingga

mempercepat proses korosi pada area yang mengalami tekanan berlebihan.

Ketiga jenis keausan tersebut saling terkait dan dapat mempengaruhi satu sama lain dalam kondisi operasional yang tidak optimal, dimana keausan awal pada satu bearing dapat menciptakan kontaminan tambahan yang memperparah keausan pada bearing lainnya, perubahan clearance akibat keausan mempengaruhi pola aliran oli pelumas ke seluruh sistem, dan peningkatan temperatur operasi akibat keausan dapat mempercepat degradasi oli dan memicu reaksi kimia yang merusak. Oleh karena itu, analisa penyebab keausan bearing crosshead harus dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan faktor operasional, kualitas pelumasan, kondisi lingkungan, dan prosedur pemeliharaan untuk mencegah terjadinya keausan berulang dan memastikan performa optimal mesin induk kapal.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan pada penelitian penyebab terjadinya keausan *pada Bearing Crosshead Kapal Mt. Gas Laura*, Peneliti dapat menyimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil penelitian didapatkan bahwa bearing crosshead mesin induk di PT. Waruna Shipyards Indonesia pada kapal MT. Gas Laura dinyatakan tidak memenuhi standard kelayakan, karena pada kondisi bearing crosshead cylinder 1, 3, dan 5 ditemukan tiga jenis keausan berbeda yaitu abrasive wear dengan goresan halus merata akibat partikel asing dalam oli pelumas, adhesive wear dengan perubahan warna kekuningan hingga kebiruan dikarenakan minyak lumas atau oil film yang kurang menimbulkan kenaikan suhu yang tinggi sehingga menyebabkan kontak metal-to-metal pada permukaan bearing, dan corrosive wear dengan pitting dan perubahan warna kehitaman akibat kontaminasi kimia dalam sistem pelumasan, sehingga bearing crosshead dinyatakan tidak layak digunakan, maka dari itu diharuskan mengganti komponen yang rusak dengan spare part yang baru untuk mengembalikan performa pada mesin induk.
2. Faktor penyebab terjadinya keausan pada bearing crosshead di PT. Waruna Shipyards Indonesia disebabkan oleh kualitas minyak lumas yang tidak memadai, clearance bearing crosshead yang tidak sesuai spesifikasi, kontaminasi partikel keras dalam sistem pelumasan, misalignment pemasangan komponen bearing crosshead, jangka waktu operasi mesin induk yang berlebihan, faktor perawatan yang tidak optimal, dan faktor manusia dalam prosedur pemeliharaan bearing crosshead.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan pada bearing crosshead peneliti memberikan saran yaitu sebagai berikut:

1. Untuk mengatasi keausan pada bearing crosshead yang menyebabkan mesin menjadi tidak optimal:
 - a. Melakukan perawatan rutin terhadap bearing crosshead dengan memperhatikan clearance bearing crosshead menggunakan metode benang

locis dan sistem pelumasan yang memadai.

- b. Melakukan manajemen suku cadang yang baik kepada pihak perusahaan khususnya untuk bearing crosshead dan komponen sistem pelumasan.
- c. Melakukan inspeksi berkala dengan pengecekan clearance bearing crosshead dan ketebalan bearing untuk mengetahui kondisi bearing yang bermasalah sebelum terjadi keausan yang parah.
- d. Meningkatkan kualitas oli pelumas dengan grade yang sesuai dan implementasi sistem filtrasi yang lebih efektif untuk mencegah kontaminasi partikel asing.
- e. Melakukan training kepada crew mesin tentang prosedur pemeliharaan bearing crosshead yang benar dan identifikasi dini terhadap gejala keausan bearing.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International. (1997). *ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International Materials Park, Ohio.
- Fredi, S. (2021). Analisis Kinerja Mesin Diesel Pada Kapal. *Jurnal Teknik Mesin*, 15(2), 45-52.
- Handoyo, E. (2014). *Teknologi Motor Diesel*. Penerbit Alfabeta, Bandung.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (Edisi Kedua). McGraw-Hill Education, New York.
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (Edisi Kedua). Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Khonsari, M. M., & Booser, E. R. (2017). *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication* (Edisi Ketiga). John Wiley & Sons, New Jersey.
- Kumar, R., & Singh, M. (2019). Studi Keausan dan Korosi pada Komponen Mesin Diesel Kapal. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 12(3), 78-85.
- Nakra, B. C., & Chaudhry, K. K. (2021). *Instrumentasi dan Pengukuran dalam Teknik Mesin*. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Priambodo, B. (1995). *Operasi dan Pemeliharaan Mesin Diesel*. Penerbit Djambatan, Jakarta.
- Saputra, A., & Wijaya, B. (2023). Sistem Monitoring Bearing Crosshead pada Mesin Induk Kapal Modern. *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(1), 23-31.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering Tribology* (Edisi Keempat). Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Taufik, M. (2016). Sistem Propulsi Kapal dan Komponen Pendukungnya. *Jurnal Teknik Perkapalan Indonesia*, 10(4), 112-120.
- Taylor, R. I. (2019). Tribologi dan Pelumasan pada Mesin Diesel Besar. *Jurnal Tribologi Internasional*, 145, 234-245.
- Watson, M. J. (2003). *Practical Ship Design*. Elsevier Ocean Engineering Series, Amsterdam.
- Woodyard, D. (2020). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (Edisi Kesepuluh). Butterworth-Heinemann, Oxford.

Lampiran 1 SK Pembimbing



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya
Eksplorasi Ilmu | Agri | Industri |
Sains dan Teknologi

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/IAK/PojPT/IV/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20236 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6621003
<https://fatek.umsu.ac.id> ✉ fatek@umsu.ac.id [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 1183/IL.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 : MHD ZULHILMI NASUTION
Npm : 2107230138
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 8 (DELAPAN)
Judul Tugas Akhir : ANALISA PENYEBAB TERJADINYA KEAUSAN PADA BEARING CROSSHEAD DI KAPAL MT GAS LAURA .

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 Wahansury Siregar, ST.,MT
NIDN: 0101017202



Lampiran 2 Lembar Asistensi

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : Analisa Penyebab terjadinya keausan pada bearing crosshead Kapal M.t gas laura
Nama : Mhd Zulhimi Nasution
NPM : 2107230138
Dosen Pembimbing : Chandra A Siregar, S.T., M.T

No	Hari/Tanggal Paraf	Kegiatan	
1.	24/7/2025	Perbaiki format	f.
2.	28/7-2025	Perbaiki bab II, III	f.
3.	1/8-2025	ACC sampul	f.
4.	8/8-2025	perbaiki bab IV	f.
		Susunan abstrak	f.
5.	21/8-2025	perbaiki bab V	f.
6.	24/11-2025	ACC sem has	f.
7.	8/11-2025	ACC, sidang	f.

Lampiran 3 Berita Acara Setelah Seminar Tugas Akhir

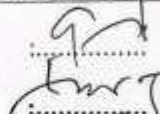
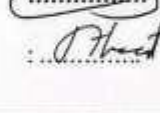
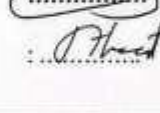








**DAFTAR HADIR SEMINAR
TUGAS AKHIR TEKNIK Mesin
FAKULTAS TEKNIK – UMSU
TAHUN AKADEMIK 2025 – 2026**

Peserta seminar

Nama : Mhd Zulhelmi Nasution

NPM : 2107230138

Judul Tugas Akhir : Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada Bearing
Crosshead Kapal MT Gas Laura.

DAFTAR HADIR			TANDA TANGAN
Pembimbing – I	:	Chandra A Siregar ST.MT	
Pembimbing – II	:	Dr Munawar A Siregar ST.MT	
Pembanding – II	:	Arya Rudi Nasir ST.MT A. Marabbi S	
No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1	2207230093	DWI RICHI ARDANA	
2	2107230028	RASYA DWI YANDA	
3	2207230036	Fernando Wibowo	
4	2207230036	AHLAD NAWALY MT	
5	2207220102	ABDUL FAHRAL	
6	2202230242	KHARUL FAHMI PURBA	
7	2207230021	WALIELI BADRUT TAMAN	
8	2207230041	MALFANNY IRAWAN	
9	2207230101	M. PRISCYLA HUTAGALUNG	
10			

Medan 21 Jumadil Akhir 1447 H
12 Desember 2025 M

Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

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

Nama : Mhd Zulhelmi Nasution
NPM : 2107230138
Judul Tugas Akhir : Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada Bearing Crosshead
Kapal MT Gas Laura

Dosen Pembanding – I : Dr Munawar A 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
.....
Sebelumnya Catatan
.....
.....

3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :

.....
.....
.....

Medan 21 Jumadil Akhir 1447 H
12 Desember 2025 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin

Dosen Pembanding- 1



Chandra A Siregar ST.MT



Dr Munawar A Siregar ST.MT

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

Nama : Mhd Zulhelmi Nasution
NPM : 2107230138
Judul Tugas Akhir : Analisa Penyebab Terjadinya Keausan Pada Bearing
Crosshead Kapal MT Gas Laura

Dosen Pembanding - I : Dr Munawar A 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 :
 - perbaiki Hasilnya dan Sebaiknya dgn
 - Metode & prosedur
 -
 -
3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :
.....
.....
.....

Medan 21 Jumadil Akhir 1447 H
12 Desember 2025 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin

Dosen Pembanding- II



Chandra A Siregar ST.MT



~~Arya Rudi Nst ST.MT~~

A. Marabbi S.

Lampiran 4 Daftar Riwayat Hidup

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. DATA PRIBADI

Nama : Mhd. Zulhilmi Nasution
Alamat : Binjai, Binjai Timur Kel. Sumber Karya Lk. VIII
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Umur : 22 Tahun
Agama : Islam
Status : Belum Menikah
Tempat, Tanggal Lahir : Binjai, 20 Mei 2003
Tinggi Dan Berat Badan : 168/ 74 kg
Kewarganegaraan : Indonesia
No. Telepon : +62 8

B. ORANG TUA

Nama Ayah : Hidayat Nasution
Agama : Islam
Nama Ibu : Siti Saroh Batubara
Agama : Islam
Alamat : Binjai, Binjai Timur Kel. Sumber Karya Lk. VIII

C. LATAR BELAKANG PENDIDIKAN

2009-2015 : SD Negeri 028226 Binjai
2015-2018 : SMP Negeri 3 Binjai
2018-2021 : SMK Taruna Tekno Nusantara Medan
2021-2026 : Universitas Muhammadiyah Sumatera Medan