

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) merupakan salah satu mesin pembangkit listrik yang menggunakan diesel sebagai penggerak utama. PLTD menggunakan bahan bakar (Solar/HSD/MFO) yang mengubah energi kimia menjadi energi mekanik melalui pembakaran dalam silinder. Energi mekanik yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator yang di *couple* pada mesin. Prinsip kerja PLTD mengikuti siklus mesin diesel yaitu 4 langkah atau 2 langkah yaitu langkah hisap, langkah kompresi, langkah kerja, dan langkah buang. Bagian-bagian utama dari PLTD adalah mesin diesel sebagai penggerak utama, generator sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik, sistem bahan bakar, sistem pendingin, sistem *starting*, serta sistem udara masuk dan gas buang. Pada PLTD, energi listrik dihasilkan dari energi panas hasil pembakaran bahan bakar (solar/HSD) yang diubah menjadi energi mekanik oleh mesin diesel, lalu menjadi energi listrik oleh generator. Proses paling penting terjadi di dalam silinder mesin diesel, tepatnya di ruang bakar. Proses pembakaran terjadi di ruang bakar (*combustion chamber*), yaitu ruang tertutup di dalam silinder yang terbentuk antara:

1. Kepala silinder (*cylinder head*) di bagian atas,
2. Piston di bagian bawah, dan
3. Dinding silinder (*cylinder liner*) di sekelilingnya.

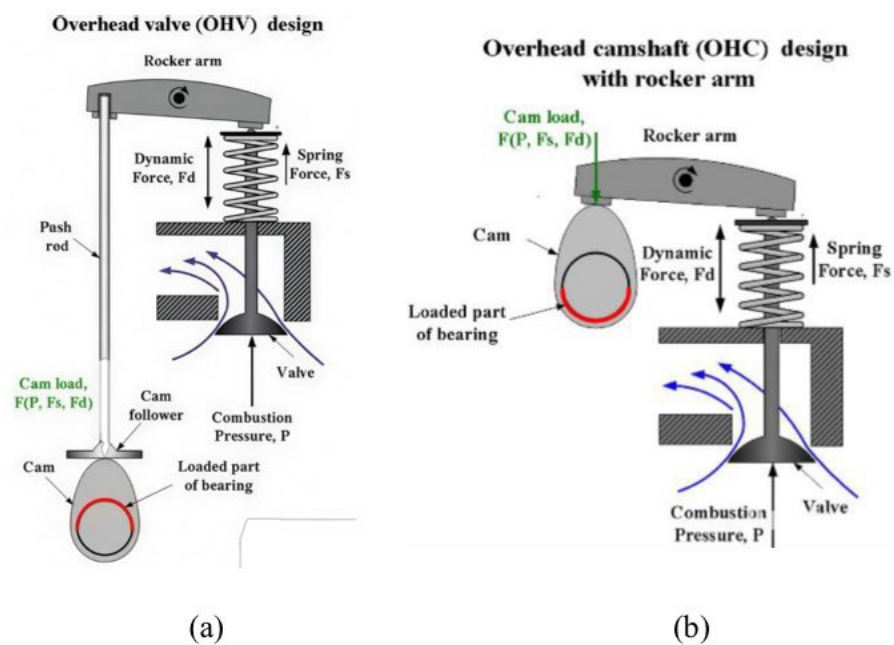
Ketika piston berada di Titik Mati Atas (TMA), volume ruang ini paling kecil dan di situlah bahan bakar disemprotkan serta dibakar. Bahan bakar disemprotkan ke ruang bakar sesuai dengan *timing* pembakaran agar menghasilkan tenaga maksimal serta efisiensi tinggi. Waktu pembakaran adalah waktu atau sudut posisi piston saat bahan bakar mulai disemprotkan (injeksi) ke dalam silinder sebelum piston mencapai Titik Mati Atas (TMA).

- a. Jika terlalu cepat (lanjutan) → pembakaran terjadi sebelum piston mencapai puncak → tekanan tinggi dapat merusak mesin.

b. Jika terlalu lambat (retard) → tenaga berkurang karena pembakaran terjadi setelah piston melewati puncak.

Jadi, *timing* harus diatur tepat agar pembakaran berlangsung optimal. Waktu pembakaran pada mesin diesel PLTD diatur oleh mekanisme sistem bahan bakar, terutama *Camshaft* (Poros Nok). *Camshaft* mengatur waktu kerja katup dan pompa bahan bakar (*fuel pump*). Nok (*cam*) pada *camshaft* menekan pendorong pompa bahan bakar pada saat tertentu, sehingga bahan bakar disemprotkan tepat waktu ke injektor. Dengan kata lain, profil dan posisi *camshaft* menentukan *timing* injeksi bahan bakar. *Camshaft* pada mesin diesel terdapat 2 sistem, ada sistem *overhead valve* (OHV) dan ada *overhead camshaft* (OHC). Pada sistem OHV, katup hisap dan buang (*valve*) dipasang di kepala silinder (*cylinder head*), sedangkan *camshaft* (poros nok) berada di dalam blok silinder. Gerakan dari *camshaft* diputar ke katup melalui komponen perantara, yaitu:

poros bubungan → tappet (pengangkat) → batang penekan → lengan ayun → katup



Gambar 2.1 Sistem OHV (a) dan OHC (b)

bagian-bagian penting dari sistem OHV dan fungsinya:

1. *Camshaft* (Poros Nok)
 - a. Terletak di dalam blok silinder
 - b. Memiliki cetakan nok (*cam lobe*) yang berfungsi menekan tappet untuk membuka katup pada waktu tertentu.

2. *Tappet (Valve Lifter / Pendorong Katup)*

- a. Bersentuhan langsung dengan nok *camshaft*.
- b. Meneruskan gerakan naik-turun dari *camshaft* ke *push rod*.

3. *Push Rod (Batang Pendorong)*

Batang logam panjang yang meneruskan gerakan dari *tappet* ke *rocker arm* di kepala silinder.

4. *Rocker Arm (Lengan Ayun Katup)*

- a. Berfungsi seperti tuas; saat *push rod* terdorong ke atas, *rocker arm* menekan ujung katup untuk membuka katup hisap atau buang.
- b. Saat nok *camshaft* berputar menjauh, pegas katup menarik kembali *rocker arm* sehingga katup menutup.

5. Katup (Katup Hisap dan Katup Buang)

- a. Katup hisap (*intake valve*): mengatur masuknya udara bersih ke ruang bakar.
- b. Katup buang (*exhaust valve*): mengatur keluarnya gas sisa pembakaran.

6. *Valve Spring (Pegas Katup)*

Menjaga agar katup tertutup rapat saat tidak ditekan oleh *rocker arm*.

Sedangkan sistem *overhead camshaft (OHC)* adalah sistem katup di mana poros nok (*camshaft*) terletak di kepala silinder (*cylinder head*), tepat di atas katup-katup hisap dan buang. Artinya, *camshaft* langsung menekan katup (melalui *rocker arm* pendek atau langsung ke *valve lifter*) tanpa menggunakan *push rod*, seperti pada sistem OHV.



Gambar 2.2 Mesin Diesel SWD9TM410RR

Mesin diesel tipe SWD 9TM410RR menggunakan mekanisme katup tipe *Overhead Valve (OHV)*, yaitu konfigurasi di mana *camshaft* ditempatkan di dalam blok mesin dan

gerakan *cam* diteruskan menuju katup melalui mekanisme *tappet*, *pushrod*, dan *rocker arm*. Sistem OHV banyak digunakan pada mesin diesel pembangkit berdaya besar karena memiliki konstruksi yang kuat serta mampu bekerja secara andal dalam operasi jangka panjang. Namun, panjangnya rangkaian mekanisme katup menyebabkan proses penyetelan *timing camshaft* menjadi lebih kompleks dan membutuhkan ketelitian tinggi agar performa pembakaran tetap optimal.

2.1.2 Camshaft

Camshaft merupakan salah satu komponen utama pada mesin diesel yang berfungsi mengatur mekanisme pembukaan dan penutupan katup masuk (*inlet valve*) dan katup buang (*exhaust valve*) secara presisi sesuai dengan siklus kerja mesin. *Camshaft* bekerja melalui profil *cam* yang berputar mengikuti putaran poros engkol (*crankshaft*) dengan rasio tertentu sehingga menghasilkan gerakan naik-turun pada katup mesin.

Secara konstruksi, *camshaft* terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu poros *cam*, *lobe cam* (*cam profile*), bantalan poros, serta mekanisme penggerak katup yang terhubung dengan *rocker arm* atau *tappet*. Bentuk profil *cam* dirancang sedemikian rupa untuk menentukan waktu pembukaan, durasi bukaan, serta waktu penutupan katup sehingga proses pemasukan udara dan pembuangan gas sisa pembakaran dapat berlangsung secara optimal.

Pada mesin diesel empat langkah, *camshaft* mengendalikan dua jenis katup utama, yaitu *inlet valve* dan *exhaust valve*. *Inlet valve* berfungsi mengatur masuknya udara ke dalam ruang bakar selama langkah hisap (*intake stroke*), sedangkan *exhaust valve* berfungsi mengeluarkan gas hasil pembakaran pada langkah buang (*exhaust stroke*). Sinkronisasi kerja kedua katup tersebut sangat penting untuk menjaga efisiensi volumetrik dan kestabilan proses pembakaran.

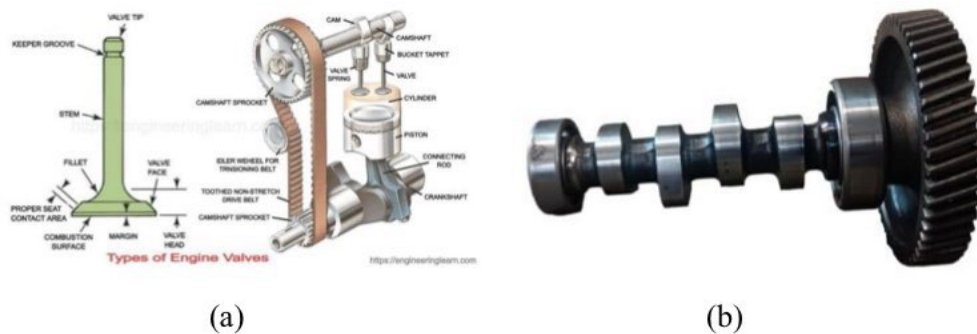
Selain mengatur katup, pada mesin diesel tertentu *camshaft* juga dilengkapi dengan *fuel cam* yang berfungsi mengendalikan waktu injeksi bahan bakar melalui mekanisme pompa injeksi. *Fuel cam* menentukan kapan bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar sehingga proses pembakaran dapat terjadi pada kondisi tekanan dan temperatur yang optimal.

Ketepatan pengaturan waktu kerja *camshaft* dikenal sebagai *timing camshaft*. *Timing camshaft* merupakan kesesuaian antara posisi sudut putar *camshaft* terhadap posisi

piston di dalam silinder. Pengaturan *timing* yang tepat memastikan bahwa katup masuk terbuka pada saat udara diperlukan, katup buang terbuka pada saat gas hasil pembakaran harus dikeluarkan, serta injeksi bahan bakar terjadi pada waktu yang optimal.

Ketidaktepatan *timing camshaft* dapat menyebabkan berbagai permasalahan operasional, seperti penurunan efisiensi pembakaran, peningkatan konsumsi bahan bakar, kehilangan tenaga mesin, peningkatan temperatur kerja, serta percepatan keausan komponen mesin. Oleh karena itu, proses penyetelan *timing camshaft* merupakan bagian penting dalam kegiatan pemeliharaan mesin diesel untuk menjaga performa dan keandalan mesin.

Pada kegiatan pemeliharaan di PLTD Gunung Malang, proses penyetelan *timing camshaft* dilakukan menggunakan *special tools cam fastening* yang berfungsi memutar *stud bolt* untuk mengatur posisi cam secara presisi. Ketepatan proses penyetelan ini menjadi faktor penting dalam memastikan sinkronisasi kerja katup dan sistem injeksi bahan bakar tetap sesuai dengan spesifikasi mesin.



Gambar 2.3 Mekanisme *camshaft*, sistem katup (a) dan *camshaft* (b)

2.1.3 Pemeliharaan Mesin Diesel

Pemeliharaan (*maintenance*) merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk menjaga kondisi mesin agar tetap beroperasi secara optimal, aman, dan andal sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Pada sistem pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), kegiatan pemeliharaan memiliki peranan penting dalam memastikan kesiapan operasi unit pembangkit, terutama pada unit yang berfungsi sebagai pembangkit cadangan (*standby unit*) yang harus selalu siap dioperasikan sewaktu-waktu.

Secara umum, pemeliharaan mesin diesel dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, di antaranya *preventive maintenance* dan *corrective maintenance*.

a. *Preventive Maintenance*

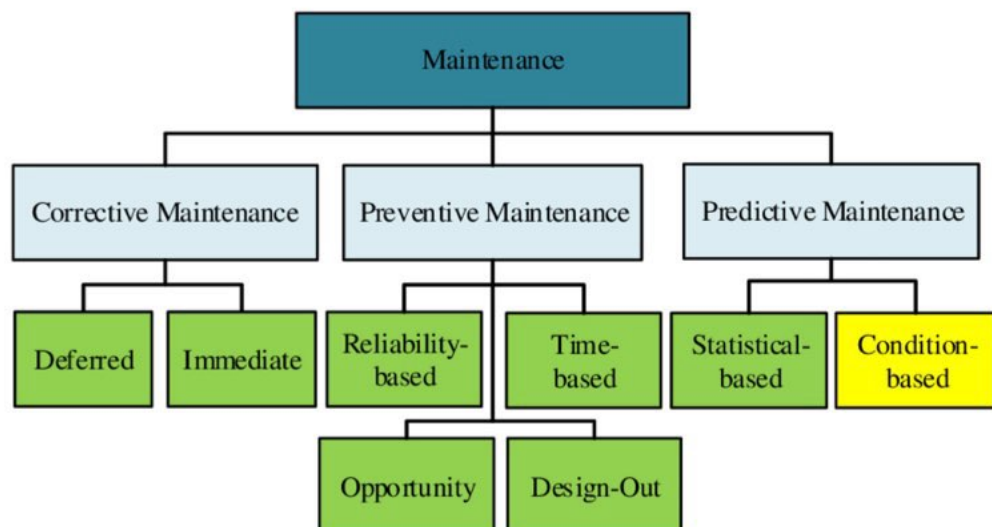
Preventive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan secara terencana dan berkala untuk mencegah terjadinya kerusakan pada mesin. Kegiatan ini meliputi inspeksi rutin, penyetelan komponen, pelumasan, penggantian komponen yang telah mencapai batas umur pakai, serta pemeriksaan parameter operasi mesin.

Pada mesin diesel pembangkit, *preventive maintenance* bertujuan untuk menjaga performa mesin, mengurangi kemungkinan gangguan operasi, serta mempertahankan tingkat keandalan unit. Salah satu kegiatan penting dalam *preventive maintenance* adalah penyetelan *timing camshaft* guna memastikan sinkronisasi kerja katup dan sistem injeksi bahan bakar tetap sesuai standar pabrikan.

b. *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau penurunan performa mesin. Pemeliharaan jenis ini bertujuan untuk memperbaiki atau mengganti komponen yang mengalami kerusakan agar mesin dapat kembali beroperasi secara normal.

Pada diesel tipe SWD 9TM410RR, *corrective maintenance* pada sistem *camshaft* umumnya dilakukan ketika terjadi keausan pada *fuel cam* maupun *inlet-exhaust cam*. Proses perbaikan melibatkan pembongkaran komponen, penggantian *camshaft*, serta penyetelan ulang *timing camshaft* agar sesuai dengan spesifikasi operasi mesin.



Gambar 2.4 Klasifikasi jenis pemeliharaan mesin

c. Pentingnya Ketepatan Penyetelan *Timing Camshaft*

Ketepatan penyetelan *timing camshaft* merupakan faktor penting dalam kegiatan pemeliharaan mesin diesel karena berpengaruh langsung terhadap proses pembakaran dan performa mesin. Ketidaktepatan penyetelan dapat menyebabkan keterlambatan atau percepatan pembukaan katup, yang berdampak pada penurunan efisiensi pembakaran, peningkatan temperatur kerja, serta percepatan keausan komponen mesin.

Dalam praktik pemeliharaan di PLTD Gunung Malang, proses penyetelan *timing camshaft* masih dilakukan secara manual menggunakan *special tools cam fastening*. Metode tersebut memerlukan tenaga fisik yang besar serta waktu pengerjaan yang relatif lama. Kondisi ini menunjukkan bahwa aspek metode kerja dalam kegiatan pemeliharaan juga memiliki pengaruh terhadap efektivitas pekerjaan dan keselamatan operator.

Oleh karena itu, pengembangan alat bantu kerja berbasis rekayasa teknis menjadi salah satu pendekatan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi pelaksanaan pemeliharaan sekaligus mengurangi risiko kerja operator pada proses penyetelan *timing camshaft*.

2.1.4 *Special Tools* dalam Pemeliharaan Mesin

Pada Dalam kegiatan pemeliharaan mesin industri, penggunaan alat bantu kerja memiliki peranan penting dalam menunjang efektivitas, ketepatan, dan keselamatan pelaksanaan pekerjaan. Salah satu jenis alat bantu yang umum digunakan adalah *special tools*. *Special tools* merupakan alat kerja yang dirancang secara khusus untuk melakukan pekerjaan tertentu pada komponen mesin yang tidak dapat dikerjakan secara optimal menggunakan peralatan umum (*general tools*).

Secara teknis, *special tools* dibuat dengan mempertimbangkan bentuk komponen, ruang kerja, kebutuhan gaya atau torsi tertentu, serta tingkat presisi yang diperlukan dalam proses pemeliharaan. Penggunaan *special tools* bertujuan untuk mempermudah proses pembongkaran, pemasangan, maupun penyetelan komponen mesin sehingga pekerjaan dapat dilakukan secara lebih efisien dan sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan oleh pabrikan.

Dalam kegiatan pemeliharaan mesin diesel pembangkit, *special tools* banyak digunakan pada pekerjaan yang memerlukan ketelitian tinggi, seperti penyetelan *timing camshaft*, pembongkaran komponen internal mesin, serta proses pengencangan dengan

nilai torsi tertentu. Penggunaan alat bantu khusus ini membantu mengurangi kesalahan kerja (*human error*) serta menjaga kualitas hasil pemeliharaan. Seiring dengan perkembangan teknologi industri, konsep *special tools* mengalami perkembangan menuju mekanisasi alat kerja. Mekanisasi merupakan proses penggantian tenaga manual manusia dengan bantuan sistem mekanik atau penggerak elektrik untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi beban kerja fisik operator. Mekanisasi alat kerja memungkinkan pekerjaan yang sebelumnya memerlukan tenaga besar dan waktu lama dapat dilakukan secara lebih cepat, stabil, dan ergonomis.

Keuntungan penerapan mekanisasi pada alat bantu pemeliharaan antara lain meningkatkan efisiensi waktu kerja, mengurangi kelelahan operator, meningkatkan konsistensi hasil pekerjaan, serta menurunkan risiko kecelakaan kerja akibat penggunaan tenaga manual secara berlebihan. Dalam perspektif keselamatan dan kesehatan kerja (K3), mekanisasi alat kerja termasuk dalam kategori rekayasa teknis (*engineering control*) yang bertujuan mengurangi bahaya langsung pada sumbernya melalui perubahan desain alat atau metode kerja.

Pada kegiatan pemeliharaan di PLTD Gunung Malang, proses penyetelan *timing camshaft* masih menggunakan *special tools cam fastening* yang dioperasikan secara manual. Kondisi tersebut menunjukkan adanya peluang pengembangan alat bantu kerja berbasis mekanisasi untuk meningkatkan efektivitas dan keselamatan kerja. Oleh karena itu, pengembangan *Electric Motorized Cam Fastening* (EMCF) merupakan bentuk inovasi *special tools* yang mengintegrasikan sistem penggerak elektrik guna menggantikan mekanisme pemutaran manual dalam proses penyetelan *camshaft*.



(a)



(b)

Gambar 2.5 *Special tools cam fastening manual* (a) dan lokasi *dial* (b)

2.1.5 Ergonomi

Ergonomi adalah ilmu tentang cara merancang tempat kerja agar cocok dengan kebutuhan tubuh manusia. Di dunia kerja modern, subjek ini semakin penting. Dengan memahami prinsip ergonomi, perusahaan bisa menciptakan lingkungan kerja yang lebih sehat, nyaman, dan meningkatkan produktivitas karyawan. Artikel ini akan membahas pentingnya analisis ergonomi di tempat kerja dan bagaimana hal itu dapat membantu meningkatkan kesehatan serta kinerja pegawai. Pentingnya analisis ergonomi di lingkungan kerja adalah untuk:

1. Mencegah Cedera dan Keluhan Ergonomi

Salah satu manfaat utama dari analisis ergonomi adalah mencegah cedera dan keluhan yang timbul karena posisi kerja yang tidak nyaman atau pekerjaan yang berulang. Dengan memperhatikan desain meja, kursi, alat kerja, dan tata letak, perusahaan bisa mengurangi risiko cedera *muskuloskeletal* seperti nyeri punggung, leher, dan bahu.

2. Meningkatkan Kualitas Hidup Karyawan

Lingkungan kerja yang ergonomis tidak hanya mengurangi risiko cedera, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup karyawan. Pegawai yang bekerja di lingkungan yang nyaman biasanya merasa lebih bahagia, lebih sehat, dan lebih berkualitas.

3. Meningkatkan Produktivitas dan Kinerja

Analisis ergonomi bisa meningkatkan produktivitas dan kinerja pegawai karena mengurangi kelelahan fisik, stres, serta gangguan kesehatan yang muncul dari bekerja dalam kondisi tidak ergonomis. Pegawai yang nyaman dan sehat cenderung bekerja lebih efisien dan efektif.

4. Mengurangi Biaya Karena Cedera

Cedera yang terjadi di tempat kerja bisa menghabiskan banyak biaya, seperti biaya pengobatan, kehilangan pegawai, dan menurunkan produktivitas perusahaan. Dengan menerapkan ergonomi, perusahaan bisa mengurangi risiko cedera dan menghemat anggaran terkait cedera kerja.

Implementasi Analisis Ergonomi di Lingkungan Kerja

1. Evaluasi Lingkungan Kerja

Langkah pertama dalam penerapan ergonomi adalah melakukan evaluasi menyeluruh pada tempat kerja, termasuk desain meja dan kursi, alat kerja, tata letak, dan pencahayaan. Tujuan dari evaluasi ini adalah untuk menemukan faktor-faktor penyebab kelelahan atau cedera pada pegawai.

2. Penyesuaian Peralatan dan Posisi Kerja

Berdasarkan hasil evaluasi, perusahaan bisa melakukan penyesuaian pada peralatan dan posisi kerja agar lebih nyaman dan aman bagi pegawai. Contohnya seperti mengatur tinggi meja, menggunakan kursi yang nyaman, menambahkan bantalan pergelangan tangan, dan menyesuaikan pencahayaan.

3. Pelatihan dan Kesadaran Karyawan

Perusahaan juga perlu memberikan pelatihan dan kesadaran kepada pegawai tentang pentingnya ergonomi dan cara mengurangi risiko cedera. Dengan mengetahui dan memiliki kemampuan yang diperlukan, pegawai bisa ikut berperan aktif dalam membuat lingkungan kerja yang lebih ergonomis.

4. Evaluasi dan Pemeliharaan Berkala

Ergonomi adalah proses yang tidak berhenti, jadi penting bagi perusahaan untuk terus mengevaluasi dan memperbarui strategi ergonomi sesuai dengan kebutuhan dan perkembangan tempat kerja.

Dalam memecahkan beberapa permasalahan kerja yang mempertimbangkan kriteria seperti teknis, ekonomis, ergonomis, sosial-budaya, hemat energi, dan ramah lingkungan, maka perlu dilakukan pendekatan secara sistemik, holistik, interdisipliner, dan partisipatif (*SHIP approach*) dengan menggunakan metode pendekatan ergonomi total. Pendekatan SHIP ini menekankan bahwa harus dilakukan pemecahan masalah yaitu:

- a. Secara sistemik, seluruh faktor yang ada dalam sistem harus dipertimbangkan agar tidak timbul masalah baru.
- b. Secara holistik, seluruh faktor yang terkait dalam sistem harus diselesaikan.
- c. Secara interdisipliner, mengoptimalkan hasil dengan melibatkan berbagai bidang ilmu yang ada.

- d. Secara partisipatif, kerjasama yang kondusif dengan melibatkan seluruh pihak agar hasil yang diterima berkualitas.

Dengan melakukan pendekatan SHIP ini, diharapkan setiap individu dapat bersikap kolaboratif, mampu bekerjasama dalam tim, menghargai segala perbedaan, dan terbuka agar tercipta keseimbangan antara beban kerja terhadap kapasitas yang dimiliki manusia. Hasil yang diinginkan yaitu sistem kerja menjadi lebih efektif, aman dan nyaman bagi pekerja, sehat, efisien dan produktivitas yang dihasilkan sangat optimal.



(a)



(b)

Gambar 2.6 Kondisi kerja tidak ergonomi (a) dan gangguan akibat ergonomi (b)

2.1.6 Metode Analisis Ergonomi

Evaluasi ergonomi kerja dilakukan untuk menilai tingkat risiko postur kerja dan beban kerja fisik yang dialami operator selama melakukan aktivitas pemeliharaan. Dalam penelitian ini digunakan beberapa metode analisis ergonomi yang umum diterapkan pada lingkungan kerja industri, yaitu metode NIOSH *Lifting Equation*, *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA), *Rapid Entire Body Assessment* (REBA), serta persentase *Cardiovascular Load* (%CVL). Metode-metode tersebut dapat digunakan untuk menilai kondisi kerja operator sebelum dan sesudah penggunaan alat penyetel *cam* elektrik.

a. Metode NIOSH *Lifting Equation*

NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) *Lifting Equation* merupakan metode analisis ergonomi yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keamanan aktivitas pengangkatan beban secara manual. Metode ini bertujuan menentukan batas beban angkat yang direkomendasikan (*Recommended Weight Limit/RWL*) sehingga risiko cedera pada sistem *muskuloskeletal* dapat diminimalkan.

Persamaan dasar metode NIOSH dinyatakan sebagai berikut:

$$RWL = LC \times HM \times VM \times DM \times AM \times FM \times CM$$

dengan:

RWL = *Recommended Weight Limit* (kg)

LC = *Load Constant* (23 kg)

HM = *Horizontal Multiplier*

VM = *Vertical Multiplier*

DM = *Distance Multiplier*

AM = *Asymmetric Multiplier*

FM = *Frequency Multiplier*

CM = *Coupling Multiplier*

Nilai RWL kemudian digunakan untuk menghitung *Lifting Index* (LI):

$$LI = \frac{Load}{RWL}$$

Nilai LI digunakan untuk menentukan tingkat risiko kerja, di mana nilai $LI > 1$ menunjukkan adanya potensi risiko cedera.

b. *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA)

RULA merupakan metode penilaian ergonomi yang digunakan untuk mengevaluasi postur tubuh bagian atas operator, khususnya pada lengan, bahu, leher, dan punggung atas. Metode ini dikembangkan untuk menilai risiko gangguan *musculoskeletal* akibat pekerjaan statis maupun gerakan berulang.

Penilaian RULA dilakukan dengan memberikan skor berdasarkan posisi tubuh operator selama bekerja. Skor akhir berkisar antara 1 hingga 7 yang menunjukkan tingkat risiko sebagai berikut:

Skor	Tingkat Risiko
1-2	Risiko Rendah
3-4	Perlu Investigasi
5-6	Perlu Perbaikan Segera
7	Perlu Tindakan Segera

Gambar 2.7 Skor dan tingkat risiko *RULA*

c. *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*

REBA merupakan metode analisis ergonomi yang digunakan untuk mengevaluasi postur seluruh tubuh operator, termasuk leher, batang tubuh, kaki, serta anggota gerak atas dan bawah. Metode ini banyak digunakan pada pekerjaan industri yang melibatkan posisi kerja dinamis dan aktivitas manual.

Penilaian REBA dilakukan melalui observasi postur kerja dan pemberian skor berdasarkan sudut posisi tubuh, beban kerja, serta aktivitas gerakan. Nilai akhir REBA menunjukkan tingkat risiko ergonomi yang dikategorikan sebagai berikut:

Skor	Tingkat Risiko
1	Risiko Sangat Rendah
2-3	Risiko Rendah
4-7	Risiko Sedang
8-10	Risiko Tinggi
≥ 11	Risiko Sangat Tinggi

Gambar 2.8 Skor dan tingkat risiko REBA

Metode REBA digunakan untuk mengevaluasi tingkat risiko postur kerja operator selama proses penyetelan *timing camshaft*.

d. *Persentase Cardiovascular Load (%CVL)*

Persentase *Cardiovascular Load* (%CVL) merupakan metode yang digunakan untuk menilai beban kerja fisiologis berdasarkan respons denyut jantung operator selama bekerja. Metode ini menggambarkan tingkat kelelahan kerja yang dialami pekerja akibat aktivitas fisik.

Persamaan %CVL dinyatakan sebagai berikut:

$$\%CVL = \frac{HR_{\text{kerja}} - HR_{\text{istirahat}}}{HR_{\text{maks}} - HR_{\text{istirahat}}} \times 100\%$$

dengan:

HR_{kerja} = denyut jantung saat bekerja (bpm)

$HR_{\text{istirahat}}$ = denyut jantung saat istirahat (bpm)

HR_{maks} = denyut jantung maksimum (220 – usia)

Interpretasi nilai %CVL digunakan untuk menentukan tingkat beban kerja

operator, mulai dari kategori ringan hingga berat.

Metode NIOSH, RULA, REBA, dan %CVL pada penelitian ini digunakan secara terpadu untuk mengevaluasi perubahan kondisi kerja operator setelah penerapan alat penyetel *cam* elektrik, sehingga dapat diketahui pengaruh penggunaan alat terhadap efektivitas kerja dan keselamatan operator.

2.1.7 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Keselamatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan suatu sistem pengelolaan yang bertujuan menjamin keselamatan, kesehatan, dan kesejahteraan tenaga kerja dalam melaksanakan aktivitas pekerjaan, khususnya pada lingkungan industri dengan tingkat potensi bahaya tinggi seperti pembangkit listrik tenaga diesel. Penerapan K3 bertujuan untuk mencegah kecelakaan kerja, penyakit akibat kerja, serta kerugian material dan gangguan operasional yang dapat timbul akibat kondisi kerja yang tidak aman.

Dalam kegiatan pemeliharaan mesin diesel, risiko K3 umumnya berasal dari interaksi langsung antara pekerja dengan peralatan mekanis, sumber energi, serta kondisi lingkungan kerja yang terbatas. Aktivitas pemeliharaan sering mengharuskan pekerja berada dekat dengan komponen mesin yang berat, bergerak, maupun sistem bertekanan tinggi, sehingga meningkatkan potensi bahaya apabila pekerjaan tidak dilakukan dengan metode kerja yang sesuai.

Salah satu faktor yang memengaruhi tingkat risiko K3 adalah metode kerja yang digunakan. Metode kerja manual yang membutuhkan tenaga fisik besar dan melibatkan postur kerja tidak ergonomis dapat menyebabkan kelelahan fisik dan gangguan *muskuloskeletal*. Kondisi kelelahan tersebut berpotensi menurunkan konsentrasi pekerja dan meningkatkan kemungkinan terjadinya *human error* yang dapat berujung pada kecelakaan kerja. Oleh karena itu, penerapan metode kerja yang aman dan ergonomis menjadi bagian penting dalam sistem K3.

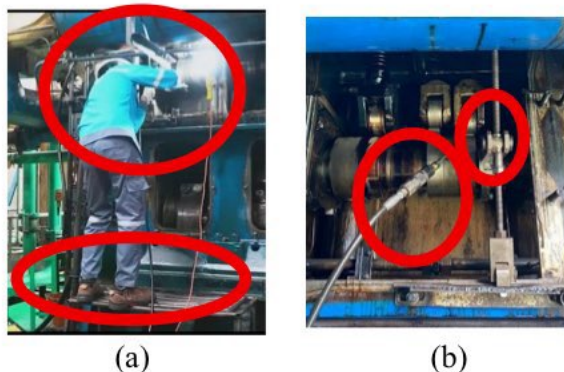
Pengendalian bahaya dalam sistem K3 dilakukan berdasarkan konsep hirarki pengendalian risiko (*Hierarchy of Control*), yang terdiri atas eliminasi, substitusi, rekayasa teknis (*engineering control*), pengendalian administratif, dan penggunaan alat pelindung diri (APD). Di antara tahapan tersebut, *engineering control* merupakan metode pengendalian yang paling efektif karena mampu mengurangi bahaya langsung pada

sumbernya melalui perubahan desain alat maupun sistem kerja, sehingga tidak bergantung sepenuhnya pada perilaku pekerja.

Ergonomi sebagai bagian integral dari K3 berfokus pada penyesuaian antara pekerjaan, alat kerja, dan lingkungan kerja dengan kemampuan manusia. Penerapan prinsip ergonomi bertujuan mengurangi beban kerja fisik, memperbaiki postur kerja, serta meningkatkan kenyamanan dan keselamatan operator. Lingkungan kerja yang ergonomis terbukti mampu menurunkan risiko gangguan *muskuloskeletal* sekaligus meningkatkan produktivitas kerja. Selain aspek fisik, K3 juga mencakup aspek psikologis dan kognitif pekerja. Beban kerja tinggi, tekanan waktu, serta kondisi kerja yang kurang nyaman dapat menimbulkan stres kerja dan menurunkan tingkat konsentrasi operator. Penurunan konsentrasi tersebut berpotensi meningkatkan kesalahan kerja yang berdampak pada keselamatan pekerja maupun keandalan sistem operasi pembangkit.

Berdasarkan konsep tersebut, pengembangan alat bantu kerja yang mampu meningkatkan keselamatan, mengurangi beban fisik operator, serta memperbaiki metode kerja merupakan bagian dari penerapan K3 berbasis rekayasa teknis. Inovasi alat kerja melalui pendekatan *engineering control* menjadi solusi yang relevan dalam menekan risiko kecelakaan kerja pada aktivitas pemeliharaan mesin diesel yang memiliki tingkat risiko tinggi.

Dengan demikian, penerapan prinsip K3 melalui inovasi alat kerja tidak hanya bertujuan melindungi tenaga kerja, tetapi juga mendukung keandalan operasi pembangkit listrik secara keseluruhan. Keselamatan kerja yang terjaga akan berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, kualitas pekerjaan, serta kinerja unit pembangkit secara berkelanjutan. unit pembangkit.



Gambar 2.9 Posisi Proses Penyetelan (a), Titik *Hose* Hidrolik dan *mur* (b)

Gambar 2.9 (a) menunjukkan posisi operator saat melakukan penyetelan *timing camshaft* menggunakan sistem konvensional. Terlihat bahwa operator berdiri di atas pijakan yang bersifat tidak permanen dan relatif sempit. Kondisi ini meningkatkan risiko kehilangan keseimbangan dan potensi terjatuh saat proses penyetelan berlangsung. Selain itu, posisi tubuh operator dalam keadaan membungkuk dan menjangkau ke arah komponen mesin dalam waktu yang cukup lama. Postur kerja tersebut tidak memenuhi prinsip ergonomi karena:

- a. Terjadi fleksi berlebihan pada punggung bagian bawah,
- b. Lengan bekerja pada posisi menjangkau,
- c. Beban gaya putar diberikan secara manual dan berulang.

Kondisi ini berpotensi menyebabkan kelelahan otot, ketegangan pada punggung bawah (*low back strain*), serta meningkatkan risiko gangguan *muskuloskeletal*.

Pada Gambar 2.9 (b) terlihat *hose* hidrolik bertekanan tinggi dengan tekanan kerja berkisar antara 650–700 bar, dimana posisi kepala dan tubuh operator berada sangat dekat dengan *hose* tersebut. Tekanan sebesar ini termasuk kategori tekanan sangat tinggi dalam sistem hidrolik industri. Kedekatan operator dengan *hose* hidrolik tersebut menimbulkan beberapa potensi bahaya, antara lain:

- a. Risiko kebocoran fluida bertekanan tinggi (*hydraulic injection injury*),
- b. Risiko *hose* terlepas akibat getaran atau tekanan berlebih,
- c. Paparan langsung terhadap komponen mesin yang bergerak.

Kombinasi antara posisi kerja tidak ergonomis dan paparan terhadap sumber energi bertekanan tinggi menunjukkan bahwa metode konvensional memiliki tingkat risiko keselamatan yang signifikan.

2.1.8 Sistem Penggerak Motor Listrik DC

Sistem penggerak merupakan bagian penting dalam perancangan alat mekanis yang berfungsi menghasilkan gerak putar untuk mengoperasikan suatu mekanisme kerja. Pada pengembangan alat penyetel *cam* elektrik (*Electric Motorized Cam Fastening/EMCF*), sistem penggerak menggunakan motor listrik arus searah (*Direct Current Motor* atau motor DC) yang dikombinasikan dengan *gearbox* sebagai penguat torsi dan pengendali kecepatan putar.

a. Prinsip Kerja Motor DC

Motor listrik DC merupakan perangkat elektromekanik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa gerak rotasi. Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara medan magnet dan arus listrik yang mengalir pada kumparan penghantar. Ketika arus listrik dialirkan pada kumparan rotor yang berada dalam medan magnet stator, akan timbul gaya elektromagnetik yang menghasilkan momen putar pada poros motor.

Besarnya torsi yang dihasilkan motor DC secara umum sebanding dengan arus listrik yang mengalir pada kumparan, yang dapat dinyatakan secara sederhana sebagai:

$$T = T \propto \Phi \times I$$

di mana:

T = torsi motor,

Φ = fluks magnet,

I = arus listrik.

Karakteristik tersebut menyebabkan motor DC mampu menghasilkan torsi awal yang relatif besar sehingga sesuai digunakan pada aplikasi yang membutuhkan gaya putar tinggi pada kecepatan rendah.

b. Hubungan Torsi dan Putaran Motor

Motor DC memiliki karakteristik hubungan antara torsi dan kecepatan putar yang berbanding terbalik. Ketika beban meningkat, kecepatan putar motor cenderung menurun, sementara torsi meningkat untuk mempertahankan putaran. Sebaliknya, pada kondisi beban ringan, motor akan berputar dengan kecepatan lebih tinggi.

Karakteristik ini menjadikan motor DC sesuai untuk aplikasi penggerak mekanisme penyetelan yang membutuhkan putaran stabil dengan torsi cukup besar, seperti pada proses penyetelan *timing camshaft*. Pada aplikasi tersebut, kebutuhan utama bukan kecepatan tinggi, melainkan kemampuan menghasilkan torsi yang stabil dan terkontrol.

c. Gearbox sebagai Penguat Torsi

Gearbox merupakan sistem transmisi mekanik yang digunakan untuk mengubah rasio kecepatan dan torsi antara motor dan beban kerja. Penggunaan *gearbox* memungkinkan peningkatan torsi keluaran dengan cara menurunkan kecepatan putar motor sesuai kebutuhan aplikasi.

Hubungan rasio reduksi *gearbox* dinyatakan sebagai:

$$i = \frac{N_{motor}}{N_{output}}$$

di mana:

i = rasio reduksi,

N_{motor} = putaran motor,

N_{output} = putaran keluaran.

Dengan penggunaan *gearbox* reduksi, motor berdaya relatif kecil dapat menghasilkan torsi keluaran yang lebih besar sehingga mampu menggerakkan mekanisme *cam fastening* secara lebih stabil dan presisi. Selain meningkatkan torsi, *gearbox* juga membantu menghasilkan putaran rendah yang sesuai untuk pekerjaan penyetelan mekanis.

d. Pengendalian Arah Putaran Motor DC

Salah satu keunggulan motor DC adalah kemudahan dalam pengendalian arah putaran. Arah putaran motor dapat diubah dengan membalik polaritas tegangan yang diberikan pada terminal motor. Perubahan polaritas ini menyebabkan arah gaya elektromagnetik berubah sehingga rotor berputar ke arah sebaliknya.

Dalam aplikasi alat penyetel *camshaft*, kemampuan perubahan arah putaran sangat diperlukan karena proses penyetelan membutuhkan gerakan maju dan mundur untuk mencapai posisi *cam* yang tepat. Pengendalian arah putaran umumnya dilakukan menggunakan rangkaian sakelar pembalik polaritas atau sistem kendali berbasis *remote control* sehingga operator dapat mengatur posisi *cam* secara lebih aman dan presisi.

Secara keseluruhan, kombinasi motor DC, *gearbox* reduksi, serta sistem kendali arah putaran membentuk sistem penggerak yang mampu menghasilkan torsi besar pada kecepatan rendah dengan kontrol yang mudah. Oleh karena itu, sistem penggerak motor listrik DC dipilih sebagai dasar teknis dalam perancangan alat penyetel *cam* elektrik (*Electric Motorized Cam Fastening/EMCF*) untuk meningkatkan efektivitas dan keselamatan kerja pada proses penyetelan *timing camshaft*.

2.2 Studi Literatur

Penyetelan *timing camshaft* merupakan proses penting dalam menjaga performa dan efisiensi kerja mesin diesel, khususnya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

(PLTD). Ketepatan penyetelan menentukan waktu pembukaan dan penutupan katup masuk serta katup buang sehingga proses pembakaran dapat berlangsung secara optimal. Dalam praktik pemeliharaan mesin diesel skala besar, proses penyetelan *timing camshaft* umumnya dilakukan pada area kerja yang terbatas di sekitar kepala silinder dan sistem *camshaft* yang saling terhubung.

Kondisi ruang kerja yang sempit menyebabkan operator sering bekerja dengan postur tidak ergonomis, seperti membungkuk, menjangkau area sulit, atau bekerja pada posisi tidak stabil. Situasi tersebut tidak hanya meningkatkan kelelahan kerja, tetapi juga menimbulkan risiko kecelakaan kerja seperti terpeleset, terjepit, maupun kontak dengan komponen panas dan bergerak. Oleh karena itu, diperlukan inovasi alat bantu kerja yang mampu meningkatkan aspek ergonomi tanpa mengurangi ketepatan proses penyetelan *camshaft*.

Pendekatan ergonomi total (*total ergonomics approach*) menjadi salah satu metode yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui perbaikan sistem kerja secara menyeluruh, termasuk desain alat kerja. Berdasarkan hasil penelusuran literatur, beberapa penelitian yang relevan dengan topik penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menurut Tazani, Simanjuntak, Sawitri, Herawati (2025) dalam jurnal yang berjudul “Penentuan Faktor Dominan Kerusakan *Camshaft* pada Diesel Generator Kapal MT. Sapta Samudra Melalui Analisis SHEL dan USG” menyatakan perlunya dilakukan perbaikan dan pemeliharaan terhadap mesin diesel terutama pada bagian *camshaft* agar tidak terjadi keausan karena bekerja secara terus menerus menerima tekanan selama mesin beroperasi.
2. Menurut Lukito Dwi Yuono, Eko Budiyo (2020) dalam jurnal yang berjudul “Pengaruh perubahan sudut *camshaft* terhadap performa mesin sepeda motor sebagai upaya efisiensi energi” menyatakan bahwa *camshaft* memiliki peran yang sangat penting dalam sistem kerja sebuah mesin. Sehingga perlu dilakukan penyetelan *camshaft* untuk menentukan waktu dan durasi pembukaan katup serta menentukan *overlap* antara katup masuk dan katup buang.
3. Menurut Purnomo, Manuaba, Adiputra (2007) dalam jurnal yang berjudul “Sistem Kerja Dengan Pendekatan Ergonomi Total Mengurangi Keluhan *Muskuloskeletal*,

Kelelahan Dan Beban Kerja Serta Meningkatkan Produktivitas Pekerja Industri Gerabah Di Kasongan, Bantul” menyatakan perlunya perancangan sistem kerja yang ergonomis terutama pada pekerjaan yang melibatkan banyak aktivitas fisik. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan ergonomi total memberikan dampak yang sangat baik seperti menurunkan beban kerja, kelelahan, cidera serta meningkatkan produktivitas para pekerja sehingga pendapatan perusahaan meningkat sangat tinggi. Menurut Yuliani, Adiatmika, Tirtayasa, Adiputra (2021) dalam jurnal yang berjudul “Penerapan pendekatan ergonomi total dalam menurunkan kelelahan kerja” menyatakan kelelahan kerja merupakan faktor penting yang dapat memengaruhi kesehatan dan keselamatan kerja. Dengan melakukan pendekatan ergonomi total, seperti perbaikan sikap dan kondisi kerja, pemberian nutrisi, serta mendesain ulang alat kerja diharapkan dapat meningkatkan kualitas kesehatan dan keselamatan kerja.

Tabel 2.1 Penelitian yang relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Penentuan Faktor Dominan Kerusakan <i>Camshaft</i> pada Diesel Generator Kapal MT. Sapta Samudra Melalui Analisis SHEL dan USG” (Tazani, Simanjuntak, Sawitri,	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah Faktor Dominan Kerusakan <i>Camshaft</i> pada Diesel Generator	Penelitian ini menggunakan metode SHEL untuk menganalisis interaksi antar elemen seperti kesalahan, keselamatan dan insiden	Hasil penelitian menemukan faktor penyebab terkikisnya <i>camshaft</i> adalah tidak sesuai dengan repair manual book, overhaul yang tidak sesuai dengan manual book, kualitas <i>camshaft</i> yang tidak sesuai, kurangnya pengetahuan terhadap perawatan dan pengoperasian	Penelitian ini menggunakan metode USG yaitu menentukan prioritas masalah sesuai dengan 3 kriteria, urgensi, keseriusan, dan pertumbuhan

	Herawati 2025)				
2.	“Pengaruh perubahan sudut <i>camshaft</i> terhadap performa mesin sepeda motor sebagai upaya efisiensi energi” (Lukito Dwi Yuono, Eko Budiyanoto (2020))	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan sudut <i>camshaft</i> terhadap performa mesin sepeda motor dan mengetahui pengaruh durasi <i>camshaft</i> terhadap konsumsi bahan bakar.	Metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah memberikan variasi perubahan sudut pada <i>camshaft</i> sebesar 20, 40, 60	Hasilnya, torsi tertinggi adalah pada variasi <i>camshaft</i> 40 dengan nilai sebesar 8,25 Nm. Tenaga tertinggi terdapat pada variasi 40 dengan angka tertinggi sebesar 8,76 PS. Akselerasi dengan waktu 14,2 detik pada kecepatan 100 km/jam. Konsumsi bahan bakar yang efisien terdapat pada variasi 20 dengan konsumsi bahan bakar 150 ml tercepat diperoleh pada variasi <i>camshaft</i> 40	Pada penelitian ini dilakukan uji dyno test pada masing-masing variabel untuk mengetahui perubahan variasi yang diberikan yang terjadi
3.	“Sistem Kerja Dengan Pendekatan Ergonomi Total Mengurangi Keluhan Muskuloskeletal, Kelelahan Dan Beban Kerja Serta Meningkatkan Produktivitas	Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sistem kerja yang optimal sehingga terjadi peningkatan produktivitas	Rancangan penelitian yang digunakan adalah rancangan eksperimental yang menggunakan randomized pre and post-test control group design dengan jumlah sampel 14 orang untuk masing-masing kelompok.	Hasil penelitian menunjukkan sistem kerja dengan pendekatan ergonomi total menurunkan keluhan muskuloskeletal pekerja sebesar 87,8%, kelelahan pekerja sebesar 77,5% ; beban kerja pekerja sebesar 21,55 denyut/menit atau sebesar 21,69%, menurunkan risiko cedera di tempat kerja sebesar 10,65%, meningkatkan	kerja pada industri Gerabah di Kasongan dengan pendekatan ergonomi total.

	Pekerja Industri Gerabah Di Kasongan, Bantul” (Purnomo, Manuaba, Adiputra 2007)			produktivitas pekerja sebesar 59,49%	
4.	“Penerapan pendekatan ergonomi total dalam menurunkan kelelahan kerja” (Yuliani, Adiatmika, Tirtayasa, Adiputra 2021)	Tujuan penelitian ini adalah melaksanakan studi literatur secara sistematis untuk mengetahui penerapan Pendekatan Ergonomi Total dalam menurunkan kelelahan kerja.	Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur secara sistematis melalui basis data seperti Science Direct, Researchgate, serta Repositori Ilmiah Indonesia. Penelitian ini, dengan menggunakan kata kunci pendekatan ergonomi total dan kelelahan kerja.	Berdasarkan studi literatur ini, terdapat celah penelitian untuk mengembangkan suatu model pendekatan ergonomi total pada bidang transportasi untuk menurunkan kelelahan pengemudi serta mengembangkan instrumen pengukuran kelelahan secara objektif dan real time. Sehingga dapat menciptakan kualitas kesehatan dan keselamatan kerja pengemudi logistik	Model Pendekatan Ergonomi Total ditemukan untuk mendapatkan solusi perbaikan yang optimal, pada bidang pekerjaan industri, pertanian, pendidikan dan perhotelan dan lainnya. Intervensi perbaikan yang dikembangkan meliputi perbaikan sikap kerja, kondisi kerja, pemberian nutrisi serta redesign alat kerja.

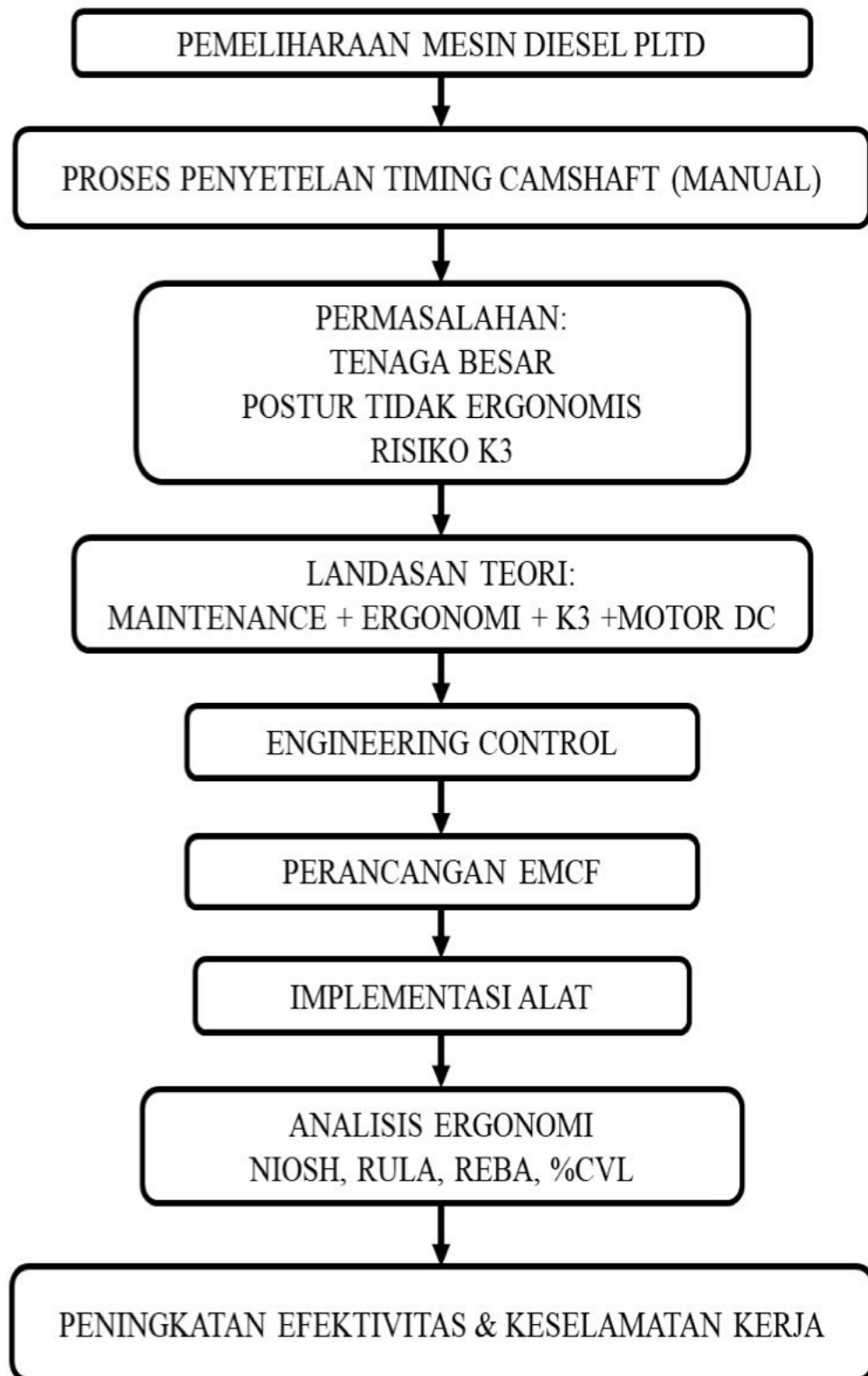
2.3 Kerangka Pemikiran

Kegiatan pemeliharaan mesin diesel pada PLTD Gunung Malang bertujuan menjaga keandalan unit pembangkit agar tetap siap beroperasi sebagai pembangkit cadangan dalam sistem interkoneksi. Salah satu pekerjaan pemeliharaan yang memiliki peran penting adalah proses penyetelan *timing camshaft*, karena ketepatan pengaturan waktu pembukaan dan penutupan katup sangat berpengaruh terhadap performa dan efisiensi kerja mesin.

Berdasarkan kondisi lapangan, proses penyetelan *timing camshaft* masih dilakukan menggunakan *special tools* konvensional dengan metode pemutaran manual. Metode tersebut membutuhkan tenaga fisik besar, durasi pekerjaan yang relatif lama, serta menyebabkan postur kerja operator menjadi kurang ergonomis akibat keterbatasan ruang kerja. Kondisi ini berpotensi meningkatkan kelelahan kerja dan risiko kecelakaan kerja.

Berdasarkan landasan teori mengenai pemeliharaan mesin diesel, ergonomi kerja, serta prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3), perbaikan metode kerja melalui pendekatan rekayasa teknis (*engineering control*) merupakan solusi yang efektif untuk mengurangi risiko kerja. Salah satu bentuk penerapan rekayasa teknis adalah pengembangan alat bantu kerja berbasis mekanisasi yang mampu menggantikan aktivitas manual berisiko tinggi. Oleh karena itu, dikembangkan alat penyetel *cam* elektrik (*Electric Motorized Cam Fastening/EMCF*) yang memanfaatkan sistem penggerak motor listrik DC dengan *gearbox* untuk menghasilkan torsi yang cukup pada kecepatan rendah sehingga proses penyetelan *camshaft* dapat dilakukan secara lebih stabil, ergonomis, dan aman.

Penggunaan EMCF selanjutnya dievaluasi melalui analisis ergonomi menggunakan metode NIOSH, RULA, REBA, dan %CVL untuk mengetahui pengaruh penggunaan alat terhadap beban kerja dan keselamatan operator. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menilai efektivitas alat dalam meningkatkan kualitas pekerjaan pemeliharaan mesin diesel. Dengan demikian, kerangka pemikiran penelitian ini menunjukkan hubungan antara permasalahan kerja manual pada penyetelan *camshaft*, penerapan konsep ergonomi dan K3, pengembangan alat berbasis sistem penggerak elektrik, serta evaluasi efektivitas kerja sebagai hasil akhir penelitian.



Gambar 2.10 Kerangka pemikiran