

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Proses dan segala bentuk penulisan skripsi ini menggunakan acuan atau referensi sebagai bahan dan sumber penelitian yang dilakukan. Beberapa referensi terkait penelitian proyek akhir yang menunjang disampaikan pada BAB ini.

1. **(A. Mahfud, 2018)**, pada jurnal penelitian berjudul “Rancang Bangun Sistem Kendali Otomatis *Draining* di *Continuous Settling Tank*” membahas tentang rancang bangun sebuah sistem kendali otomatis pada *settling tank* area pabrik kelapa sawit yang mana digunakan untuk membuang kadar air, dengan demikian *crude oil* yang dihasilkan bisa lebih maksimal dan mempunyai kualitas lebih baik. Sistem yang digunakan menggunakan *Time Delay Relay* dan *Solenoid Valve* untuk mengatur buka tutup katupnya dengan hasil ujinya didapatkan total air yang terbangun sebanyak 1.570 cm³ dengan setting 3 timer 177 detik, 10 detik, dan 88 detik.
2. **(Putu Rizky et al, 2022)**, jurnal penelitian yang berjudul “Kajian Penerapan PLC Untuk Meningkatkan Produktivitas Proses Pengisian Air dan Penutup Botol Otomatis” membahas tentang penggunaan PLC sebagai sistem otomasi pengisian air pada botol dengan ukuran 600 ml dan pengaturan menutup botol minum dengan tujuan untuk mempermudah pekerjaan dan efisiensi waktu pekerjaan. Dengan menggunakan sensor dan *limit switch* serta perangkat PLC CPE1E, sistem yang didapat adalah dengan botol minum 600 ml dibutuhkan waktu 19 detik untuk mengisi air minum hingga penuh dan tutup botol akan dirapatkan oleh limit switch hingga kencang dan motor pun berhenti.
3. **(Endi Perwitosari, 2025)**, pada jurnal penelitian yang berjudul “Implementasi Sistem Kendali *Automatic Drain* Di *Pure Oil Tank* Stasiun *Clarification* Pabrik Kelapa Sawit GVL Tarjuowon Mill Sinoe County Liberia” membahas mengenai sistem penguras air dan endapan pada *pure oil tank* di mana saat proses klarifikasi masih terdapat air, *sludge*, dan kotoran. Dengan menggunakan relai penunda waktu dan relai kontrol, katup akan dikontrol sesuai waktu yang diatur untuk membuang kotoran dan air pada tangki. Setelah dilakukan uji, didapatkan kadar air pada mintak murni yang berada di tangki berkurang dari 0.56% menjadi 0.38%.

4. **(Sapdaroji, 2024)**, dalam Tugas Akhir berjudul “Perencanaan Penambahan Elektrik Starter Pada *Vibro Roller* Sebagai *Backup* Pada Kondisi *Emergency*” ini membahas mengenai penambahan sistem *safety device* berupa *safety starting* yang digunakan untuk kondisi *emergency* saat starting motor dalam kondisi tidak baik yang mengakibatkan tidak dapatnya memutar *flywheel* pada diesel engine. Hasilnya dengan penambahan *safety device* tersebut mengurangi kegagalan sistem *starting* pada *engine*.
5. **(Bintara, 2020)**, pada Tugas Akhir dengan judul “Pengaturan Sistem Drainase *Basement* Rumah Susun Dengan Pompa Berbasis PLC” ini membahas mengenai penggunaan PLC dalam mengendalikan level air pada bak *basement* yang akan dialirkan ke drainase lewat pompa yang diaktifkan menggunakan kontroler tersebut. Hasilnya dengan menandai ketinggian air di 5, 10, dan 20 cm akan memberi sinyal ke PLC untuk mengaktifkan pompa sehingga dapat membuang air ke drainase.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Lube Truck

Lube truck adalah salah satu jenis *support equipment* yang sangat penting dalam operasional pertambangan batubara. Unit ini berfungsi sebagai kendaraan khusus yang membawa dan mendistribusikan berbagai jenis pelumas serta cairan pendukung lainnya untuk kebutuhan *maintenance* alat-alat berat di lapangan. Karena kegiatan penambangan sering berlangsung jauh dari *workshop* atau bengkel utama, kehadiran *lube truck* membuat perawatan bisa dilakukan langsung di lokasi kerja (*field area*) sehingga menghemat waktu dan menjaga *Physical Availability* (PA) unit yang di-*support* tetap tinggi.

Pada *lube truck* dilengkapi dengan beberapa tangki terpisah yang masing-masing berisi bermacam tipe oli baik yang *single grade* maupun *multi-grade*, grease, coolant, maupun cairan lain yang dibutuhkan oleh unit-unit tambang. Selain itu, terdapat pompa, hose, dan *metering system* yang memudahkan teknisi untuk melakukan pengisian pelumas ke *excavator*, *dump truck*, *dozer*, atau *motor grader* di *pit area*. Dengan sistem ini, teknisi tidak perlu membawa drum atau wadah pelumas manual, sehingga lebih efisien dan aman dari risiko tumpahan.



Gambar 2.1 Unit Lube Truck

Dalam operasional pertambangan batubara, *lube truck* tidak hanya hadir dalam bentuk standar, tetapi juga berkembang dengan berbagai tambahan fungsi sesuai kebutuhan di lapangan. Menurut pengelompokan atau jenis *lube truck* [6], *Lube Truck* sendiri terdapat beberapa jenis atau spesifikasi tergantung dari perlengkapan apa yang ada di truck tersebut. Jenis yang paling sederhana adalah *standard lube truck*, yaitu kendaraan yang hanya membawa tangki berisi oli, grease, coolant, dan cairan lain, lengkap dengan sistem pompa serta selang distribusi. Fungsinya murni untuk mendukung kegiatan pelumasan dan penggantian fluida pada alat berat.

Namun, seiring meningkatnya kebutuhan, hadir pula lube & fuel truck atau sering disebut combo truck. Kendaraan ini tidak hanya membawa pelumas, tetapi juga dilengkapi dengan tangki bahan bakar solar, sehingga satu unit kendaraan bisa melayani sekaligus pengisian BBM dan pelumasan alat berat. Jenis ini sangat efisien karena mengurangi jumlah armada *support* yang harus masuk ke *pit*.

Selain itu, ada pula *lube truck* yang dilengkapi dengan *air compressor*. Tambahan ini membuat lube truck lebih fungsional, karena udara bertekanan dapat digunakan untuk membersihkan *filter*, menyemprotkan udara bertekanan untuk membersihkan kotoran dari komponen mesin, mengoperasikan peralatan pneumatik, bahkan mengisi angin ban. Dengan adanya *air compressor*, teknisi dapat melakukan pekerjaan perawatan lebih cepat dan efektif di lapangan.

Jenis berikutnya yang lebih lengkap adalah *service truck*, yang bisa disebut sebagai pengembangan dari lube truck. *Service truck* tidak hanya membawa pelumas dan air compressor, tetapi juga dilengkapi dengan peralatan *service* tambahan seperti

crane kecil, genset, hingga welding set. Dengan fitur ini, service truck dapat berfungsi sebagai bengkel berjalan, memungkinkan perbaikan darurat atau pekerjaan pemeliharaan ringan langsung di lokasi tambang tanpa harus menarik unit ke *workshop* [7].

2.2.2 Air Compressor XAS88

Di area pertambangan batubara *air compressor* memiliki peranan penting. Kompresor udara digunakan untuk memasok energi dalam bentuk udara bertekanan pada berbagai peralatan pneumatik, seperti *impact wrench*, *air drill*, atau *chipping hammer*. Selain itu, udara bertekanan sering dimanfaatkan untuk pembersihan komponen dari debu batubara atau kotoran, membantu sistem instrumentasi pneumatik, hingga mendukung proses perawatan unit di lapangan [8]. Salah satu tipe air compresor yang digunakan adalah air compressor dari Atlas Copco dengan tipe XAS88.



Gambar 2.2 Air Compressor Portable XAS88

Menurut pengertian air compressor *portable* atau *movable* [9], Air Compressor tipe XAS 88 merupakan salah satu unit kompresor *portable* yang dirancang untuk menghadirkan pasokan udara bertekanan secara andal di lapangan. Unit ini menggunakan sistem *rotary screw compressor* dengan penggerak mesin diesel Kubota, sehingga mampu menghasilkan debit udara sekitar 5 m³/menit pada tekanan kerja standar 7 bar. Desainnya dibuat ringkas dan ringan, dengan bobot di bawah 750 kg, sehingga mudah dipindahkan bahkan ditarik menggunakan kendaraan ringan. XAS88 juga dilengkapi dengan Hard Hat Canopy yang kuat dan rangka penahan tumpahan cairan, menjadikannya aman terhadap kondisi kerja yang keras dan lingkungan yang berdebu seperti di tambang terbuka.



Gambar 2.3 Air Compressor di Unit Lube Truck

Ketika dipasang sebagai salah satu fasilitas di atas lube truck, fungsi *air compressor* menjadi semakin vital. Lube truck sendiri merupakan unit servis lapangan yang membawa oli, grease, coolant, dan bahan pendukung perawatan alat berat. Di sini, *Air Compressor XAS 88* berfungsi untuk menyediakan udara bertekanan bagi *air tools* yang digunakan mekanik saat melakukan perawatan, misalnya untuk membuka baut berdiameter besar dengan *impact wrench*. Selain itu, udara bertekanan juga dipakai untuk membantu sistem *pneumatic pump* pada *lube truck*, yaitu pompa yang menyalurkan oli atau grease dari tangki menuju alat berat yang sedang diservis. Dengan adanya *air compressor*, pekerjaan perawatan di tambang dapat dilakukan lebih cepat, praktis, dan efisien tanpa perlu mengandalkan fasilitas bengkel tetap.



Gambar 2.4 Box Attachment Bagian Belakang Unit Lube Truck

Box attachment yang ada di lube truck berisi *air motor*, *tube pump*, dan *diaphragm pump* di mana suplai udara bertekanan dari *air compressor* dialirkan ke komponen-komponen tersebut yang akan dikeluarkan melalui hose *output* pada hose reel untuk mengeluarkan macam-macam tipe oli, grease, maupun coolant untuk

kebutuhan lubrikasi pada unit yang ditangani seperti *excavator*, *dump truck*, dan lainnya. Suplai udara bertekanan ini harus maksimal, jika terdapat kontaminan seperti debu atau air, maka akan menjadi endapan yang akan mempengaruhi kinerja air motor dan pompa.

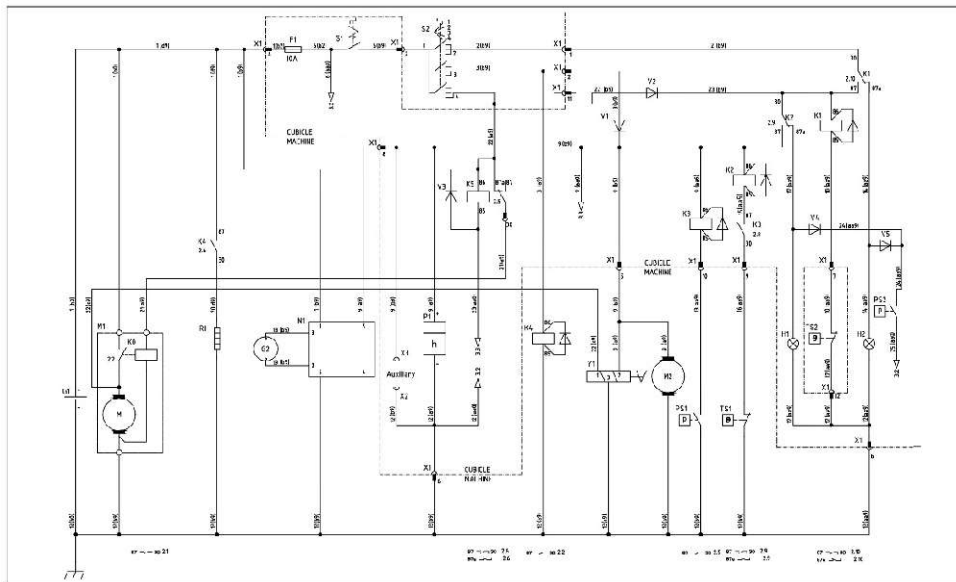
2.2.3 *Electrical System Air Compressor XAS88*

Electrical system pada Air Compressor XAS88 mempunyai sistem yang sederhana karena *engine* yang digunakan hanya memiliki 4 cylinder dengan output power keluaran 45 HP, serta kontrol sistem yang tidak terlalu rumit.

Performance		XAS 88
Normal effective working pressure	Psi (g)	100
Free air delivery	CFM	175
Max. ambient temperature at sea level	°C	50
Min. starting temperature	°C	-10
Min. starting temperature (cold start aid)	°C	-20
Engine		
Engine brand		Kubota
Engine model		V1505 IT4
Number of cylinders		4
Power output @ normal shaft speed	hp	45
Full load rpm	rpm	3000
Unload rpm	rpm	1850
Fuel consumption	L / hr	7.6
Capacity		
Engine oil	L / US Gal	5.5 / 1.45
Compressor oil	L / US Gal	7.7 / 2.05
Fuel tank	L / US Gal	60 / 15.85

Gambar 2.5 Datasheet Engine Air Compressor XAS88

Berikut adalah *single line diagram* dari Air Compressor XAS88 di mana air compressor tipe ini adalah tipe *engine drive* yaitu menggunakan *diesel engine* sebagai penggerak screw untuk menghasilkan udara dengan *supply* tegangan dari battery 12VDC. Atau dapat dilihat lebih jelasnya pada **Lampiran 3**.



Gambar 2.6 Wiring Diagram Air Compressor XAS88

Dengan menggunakan *supply* tegangan dari battery 12VDC, dan kunci kontak yang mengatur tegangan diarahkan ke mana, jika posisi kunci kontak ke “ON” atau Nomor 2 maka indikator lampu H2 akan menyala dari kontak K1 30 ke 87a karena *coil* K1 belum aktif, sekaligus sebagai *general check* yang berarti siap untuk dihidupkan. Kemudian kunci kontak diputar lagi ke nomor 3 arus mengalir ke *coil* K2, K3, dan K4. 30 K1 akan menuju 87 dan mematikan lampu H2, lalu 30 K2 akan terhubung dengan 87, dan menghubungkan juga kontak 87 & 30 K3, terakhir relay pre-heat K4 juga akan aktif. Mengaktifkan *coil* solenoid, hour meter, fuel pump, dan terminal 5 voltage regulator. Saat kunci kontak diputar ke arah “START” arus menuju ke *coil* starting motor, memutar starting motor yang nantinya pinion akan memutar *flywheel engine* sehingga terjadi pembakaran di ruang bakar *chamber piston engine* dan *engine running* secara normal. Engine tersebut berada 1 shaft yang sama dengan *screw compressor* di mana *screw* ini memutar udara dari inlet sehingga menjadi bertekanan yang akan disalurkan ke *box attachment*.

Kontrol sistem *engine air compressor* diatur dan dikendalikan oleh sensor *oil pressure* dan *temperature sensor* sehingga bisa menjadi sistem proteksi terhadap engine itu sendiri. Selain itu *screw compressor* juga mempunyai *temperature screw sensor* di mana mengatur tingkat suhu dari oli *compressor* yang digunakan untuk mendinginkan udara bertekanan di dalam. Saat terjadi *overheat* atau *temperature*

sensor TS1 bekerja maka akan *open circuit*, K3 tidak mendapatkan *ground* lalu *open* sehingga *coil* K2 tidak aktif K2 akan mengubah posisi kontak 30 menuju 87a sehingga lampu H1 akan aktif sebagai indikator bahwa *temperature sensor* aktif. Kemudian jika TS2 yang bekerja atau terjadi *overheat* pada *compressor* maka akan *open circuit coil* K1 tidak akan aktif karena tidak mendapatkan *ground* sehingga kontak 30 K1 terhubung dengan 87a lalu lampu H2 akan menyala sebagai indikator bahwa terjadi *overheat* di area *compressor*.

2.2.4 Air Filter Regulator

Air filter regulator adalah penyaring udara hasil atau keluaran dari *air compressor* sebelum disalurkan ke pompa dan *air motor* di *box attachment lube truck*. udara bertekanan yang keluar dari kompresor tidak serta-merta langsung disalurkan ke *air motor* atau pompa. Sebelum digunakan, udara tersebut terlebih dahulu melewati *air filter regulator*. Komponen ini berperan sebagai penyaring sekaligus pengatur, sehingga kualitas udara yang dipasok benar-benar sesuai kebutuhan peralatan pneumatik seperti pompa dan motor itu tadi [10].

Fungsi dari *air filter* adalah menyaring kotoran, debu, uap oli, maupun kelembapan yang terbawa bersama aliran udara bertekanan. Hal ini penting karena mengantisipasi udara dari kompresor yang masih mengandung partikel oli dan air [11]. Jika kotoran dan kelembapan ini dibiarkan, maka akan mempercepat kerusakan pada *air motor* maupun pompa di *lube truck*, misalnya dengan terjadinya karat, aus, atau penyumbatan pada *inner part*.



Gambar 2.7 Air Filter Double Regulator

Regulator juga memastikan bahwa udara yang masuk ke air motor dan pompa berada pada tekanan kerja yang tepat dan stabil. Walaupun kompresor mampu menghasilkan tekanan sampai 7 bar, tidak semua attachment membutuhkan tekanan sebesar itu. Menurut (Hernandez & David, 2018), dengan adanya regulator, tekanan bisa diturunkan atau diatur sesuai spesifikasi peralatan, sehingga peralatan bekerja optimal tanpa risiko *overpressure*. Kompresor sering menghasilkan tekanan yang fluktuatif, sementara pompa oli atau peralatan pneumatik membutuhkan tekanan yang konsisten agar bekerja optimal. Regulator memastikan tekanan tidak terlalu tinggi yang bisa merusak komponen, dan tidak terlalu rendah yang membuat kerja sistem menjadi lemah. Dalam beberapa aplikasi, air filter regulator juga dilengkapi dengan lubricator—bagian yang menambahkan kabut oli ke aliran udara. Kabut oli ini berfungsi melumasi komponen internal, sehingga gerakan lebih halus dan umur pakai lebih panjang.

Maintenance dilakukan secara rutin agar fungsi filter dan regulator tidak menurun. Filter harus dibersihkan atau diganti bila sudah penuh dengan kotoran, karena filter yang tersumbat akan menurunkan aliran udara. Bagian regulator perlu dicek apakah ada kebocoran atau jarum pengatur tekanan masih akurat. Jika ada lubricator, pastikan selalu terisi dengan oli khusus pneumatik, bukan oli mesin biasa, karena jenis oli yang salah bisa merusak seal dan komponen. Selain itu, pemeriksaan berkala terhadap kondisi selang dan sambungan juga penting, karena kebocoran kecil bisa membuat sistem kehilangan efisiensi.

Singkatnya, air filter regulator bukan hanya sekadar aksesoris, melainkan penjaga kualitas udara dan kestabilan tekanan dalam sistem kompresor maupun pompa oli. Dengan definisi yang jelas, fungsi yang vital, dan perawatan yang teratur, alat ini memastikan seluruh rangkaian pneumatik bekerja dengan andal dan tahan lama.

Valve atau keran yang ada di bagian bawah regulator tersebut perlu dibuka dengan tujuan membuang air hasil kondensasi dari udara bertekanan yang disuplai screw compressor sehingga udara yang akan menggerakkan air motor dapat dikurangi kadar airnya, itulah mengapa ada 2 tabung pada regulator, tabung pertama digunakan sebagai *water separator* dan filter kasar, dan tabung kedua sebagai filter halus serta lubrikator untuk udara yang masuk ke pompa supaya terdapat pelumasan, untuk oli yang masuk bersama udara ini sangat sedikit karena hanya untuk pelumasan inner part seperti relay valve, power valve, dll pada pompa dan air motor.

2.2.5 PLC Siemens LOGO!

Programmable Logic Controller (PLC) pada dasarnya adalah sebuah komputer atau perangkat yang khusus dirancang untuk mengontrol suatu proses atau mesin. Proses yang dikontrol ini dapat berupa regulasi variable secara kontinu seperti pada sistem servo, atau hanya melibatkan control dua keadaan (on/off) saja, tetapi dilakukan secara berulang-ulang seperti umum dijumpai pada mesin pengeboran, system konveyor dan lain sebagainya [13]. Walaupun istilah PLC secara bahasa berarti pengontrol logika yang dapat diprogram, tetapi pada kenyataannya, PLC secara fungsional tidak lagi terbatas pada fungsi-fungsi logika saja.

PLC bekerja dengan cara yang sederhana namun sangat efektif: menerima informasi dari lingkungan melalui sensor, memproses data sesuai logika yang sudah diprogram, lalu mengirimkan perintah ke perangkat yang harus bergerak. Bagian input adalah pintu masuk informasi. Sensor-sensor seperti tombol, limit switch, sensor suhu, atau sensor tekanan mengirimkan sinyal ke PLC. Sinyal ini bisa berupa kondisi “on/off” sederhana, atau data analog yang menunjukkan nilai tertentu. Input ini memberi tahu PLC tentang keadaan nyata di lapangan misalnya apakah sebuah motor sudah menyala, apakah pintu sudah tertutup, atau apakah tekanan sudah mencapai batas. Setelah informasi masuk, PLC melakukan proses. Di sinilah program yang ditanamkan bekerja.

Program PLC biasanya berupa logika *ladder diagram* atau bahasa pemrograman lain yang sesuai standar industri. Logika ini menentukan bagaimana PLC harus merespons setiap kondisi input. Misalnya, jika tombol ditekan dan sensor tekanan menunjukkan nilai aman, maka PLC akan memutuskan untuk menyalakan pompa. Proses ini berlangsung sangat cepat, dalam hitungan milidetik, sehingga sistem bisa bereaksi hampir seketika terhadap perubahan kondisi. Hasil dari proses tersebut kemudian dikirimkan ke bagian output. Output PLC berupa sinyal yang mengendalikan aktuator seperti motor listrik, solenoid valve, lampu indikator, atau alarm. Dengan output ini, PLC benar-benar menggerakkan dunia nyata: membuka katup, menyalakan conveyor, mengaktifkan pompa oli, atau mematikan sistem jika terjadi kondisi berbahaya. Sekarang PLC dapat melakukan perhitungan-perhitungan aritmatika yang relative kompleks, fungsi komunikasi, dokumentasi dan lain sebagainya (sehingga dengan alasan ini dalam beberapa buku manual islitah PLC sering hanya ditulis sebagai *PC-Programmable Controller* saja), dan salah satu PLC yang sering digunakan adalah PLC Siemens LOGO! karena tidak rumit dan *friendly-user*.

LOGO! cocok dipakai untuk mengendalikan sistem yang tidak terlalu kompleks, misalnya kontrol pompa, penerangan, HVAC, pintu otomatis, panel industri, dan lainnya. Karena itu, PLC ini sering digunakan baik di industri skala kecil, bangunan komersial, maupun oleh hobiis atau teknisi yang ingin membuat sistem otomasi sederhana [14].



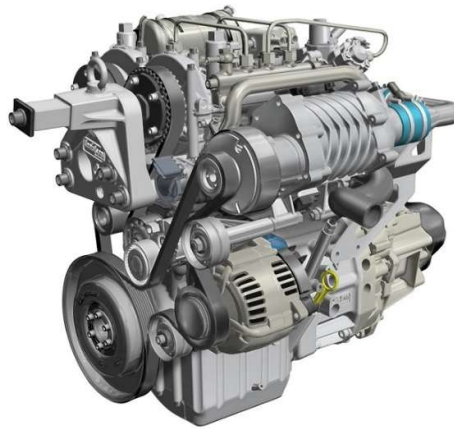
Gambar 2.8 PLC Siemens LOGO!

Siemens LOGO! adalah salah satu jenis micro PLC (*Programmable Logic Controller*) buatan Siemens yang dirancang khusus untuk aplikasi otomasi

sederhana. Unit ini sering disebut juga sebagai logic module, karena ukurannya yang ringkas, harganya relatif terjangkau, dan mudah digunakan bahkan oleh pengguna yang baru belajar dunia PLC. Siemens LOGO! memiliki bentuk compact dengan layar kecil di bagian depannya. Layar ini bisa menampilkan teks, parameter, bahkan status input/output [15]. Tombol-tombol di depannya memungkinkan pemrograman dasar dilakukan langsung dari unit, tanpa laptop sekalipun. Namun, untuk aplikasi yang lebih kompleks, biasanya digunakan perangkat lunak LOGO! Soft Comfort.

2.2.6 Diesel Engine

Diesel engine atau mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang bekerja berdasarkan prinsip penyalaaan sendiri (*self-ignition*) akibat tekanan kompresi yang tinggi di dalam ruang bakar. Berbeda dengan mesin bensin yang menggunakan busi untuk memicu pembakaran, mesin diesel tidak memerlukan sistem pengapian eksternal. Udara murni terlebih dahulu dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi, kemudian bahan bakar diesel diinjeksikan ke dalam ruang bakar sehingga terbakar secara spontan. Prinsip ini dikenal sebagai siklus Diesel, yang pertama kali dikembangkan oleh *Rudolf Diesel* pada akhir abad ke-19.



Gambar 2.9 Konstruksi *Diesel Engine*

Secara konstruksi, diesel engine terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu blok silinder, piston, connecting rod, crankshaft, cylinder head, sistem injeksi bahan bakar, sistem pelumasan, sistem pendinginan, serta sistem pemasukan dan pembuangan udara. Proses kerjanya umumnya mengikuti siklus empat langkah (*four-*

stroke cycle), yaitu langkah isap, kompresi, usaha (*power*), dan buang. Pada langkah isap, udara masuk ke dalam silinder. Pada langkah kompresi, udara ditekan hingga mencapai rasio kompresi tinggi (biasanya 14:1 hingga 25:1). Saat mendekati titik mati atas, bahan bakar disemprotkan melalui injector bertekanan tinggi sehingga terjadi pembakaran yang menghasilkan gaya dorong pada piston. Energi mekanik dari gerakan piston kemudian diubah menjadi putaran poros engkol (*crankshaft*).

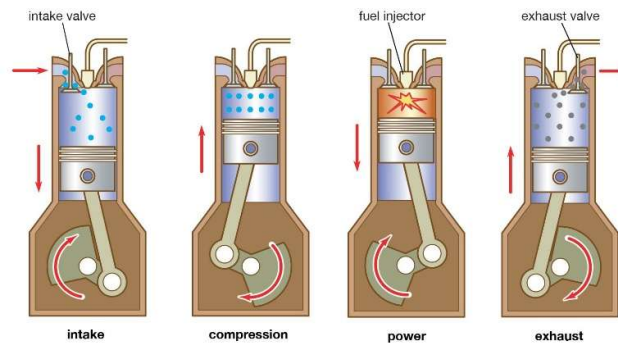
Keunggulan utama mesin diesel adalah efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan mesin bensin, terutama karena rasio kompresinya yang besar dan karakteristik bahan bakar diesel yang memiliki nilai kalor tinggi. Selain itu, mesin diesel memiliki torsi yang besar pada putaran rendah, sehingga sangat cocok digunakan pada aplikasi beban berat seperti genset, alat berat, kapal, truk tambang, dan mesin industri. Dalam konteks sistem kelistrikan seperti yang sering digunakan pada pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) atau sistem genset sinkron diesel engine berfungsi sebagai prime mover yang menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik.

Dalam pengoperasiannya, *diesel engine* juga dilengkapi dengan berbagai sistem pendukung dan proteksi, seperti governor untuk mengatur kecepatan putaran, sistem kontrol tekanan oli, proteksi temperatur air pendingin, serta sistem shutdown otomatis jika terjadi kondisi abnormal. Perkembangan teknologi modern telah menghadirkan sistem common rail injection dan kontrol elektronik (ECU) yang meningkatkan efisiensi pembakaran, mengurangi emisi gas buang, dan memperbaiki respons mesin terhadap perubahan beban.

Diesel engine pada Atlas Copco XAS 88 berfungsi sebagai sumber tenaga utama yang menggerakkan elemen kompresor untuk menghasilkan udara bertekanan. Unit ini termasuk jenis kompresor udara portabel yang banyak digunakan pada pekerjaan konstruksi, pertambangan, dan industri lapangan yang tidak memiliki suplai listrik tetap. Mesin diesel yang digunakan umumnya adalah tipe empat langkah berpendingin cairan, seperti Kubota V1505, yang dirancang untuk menghasilkan daya dan torsi stabil pada putaran kerja tertentu. Tenaga mekanik dari poros engkol mesin kemudian diteruskan secara langsung ke elemen kompresor tipe rotary screw (*air end*), sehingga proses kompresi udara dapat berlangsung secara kontinu.

Secara prinsip kerja, ketika mesin diesel dihidupkan, udara murni masuk ke

dalam silinder dan dikompresi hingga mencapai temperatur tinggi. Bahan bakar diesel kemudian diinjeksikan ke ruang bakar dan terbakar secara spontan akibat tekanan kompresi tersebut. Proses pembakaran menghasilkan energi mekanik berupa gerakan piston yang diteruskan menjadi putaran crankshaft. Putaran ini digunakan untuk memutar sepasang rotor sekrup pada kompresor, yang berfungsi menghisap udara dari atmosfer, menjebaknya di antara ulir rotor, lalu memperkecil volumenya sehingga tekanannya meningkat. Udara bertekanan yang dihasilkan selanjutnya disalurkan ke sistem pemisah oli dan udara sebelum keluar menuju saluran distribusi.



Gambar 2.10 Mekanisme *Diesel Engine 4 Stroke*

Mesin diesel 4 langkah (*four-stroke diesel engine*) bekerja berdasarkan satu siklus kerja yang terdiri dari empat langkah piston dalam dua putaran penuh poros engkol (720° sudut engkol). Setiap langkah memiliki fungsi spesifik yang saling berurutan untuk menghasilkan tenaga mekanik dari proses pembakaran bahan bakar akibat kompresi tinggi. Langkah pertama adalah langkah hisap (*intake stroke*). Pada tahap ini, piston bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) menuju Titik Mati Bawah (TMB). Katup masuk (*intake valve*) terbuka, sedangkan katup buang (*exhaust valve*) tertutup. Gerakan turun piston menciptakan tekanan negatif di dalam silinder sehingga udara murni dari luar terhisap masuk ke ruang bakar. Berbeda dengan mesin bensin, pada mesin diesel tidak ada campuran udara dan bahan bakar pada tahap ini; yang masuk hanya udara.

Langkah kedua adalah langkah kompresi (*compression stroke*). Piston bergerak dari TMB kembali ke TMA dengan kedua katup (masuk dan buang) dalam kondisi tertutup. Udara yang telah masuk dikompresi hingga volumenya sangat kecil. Karena rasio kompresi mesin diesel tinggi (sekitar 14:1 hingga 25:1), tekanan dan

temperatur udara meningkat drastis, bahkan dapat mencapai lebih dari 500°C. Temperatur tinggi inilah yang memungkinkan bahan bakar diesel terbakar tanpa bantuan busi.

Menjelang akhir langkah kompresi, terjadi proses injeksi bahan bakar. Injector menyembrotkan solar dalam bentuk kabut halus ke dalam ruang bakar dengan tekanan tinggi. Karena suhu udara sudah sangat panas akibat kompresi, bahan bakar langsung terbakar secara spontan (*self-ignition*). Proses pembakaran ini tidak terjadi sekaligus, tetapi berlangsung sangat cepat dan terkendali, menghasilkan tekanan gas yang sangat tinggi di dalam silinder.

Langkah ketiga adalah langkah usaha atau ekspansi (*power stroke*). Tekanan tinggi hasil pembakaran mendorong piston dari TMA kembali ke TMB. Inilah satu-satunya langkah yang menghasilkan tenaga mekanik. Gaya dorong piston diteruskan melalui connecting rod ke crankshaft sehingga menghasilkan putaran. Putaran crankshaft inilah yang kemudian digunakan untuk menggerakkan beban, seperti generator pada genset atau elemen kompresor pada air compressor.

Langkah keempat adalah langkah buang (*exhaust stroke*). Setelah piston mencapai TMB, katup buang terbuka dan piston bergerak kembali ke TMA. Gerakan ini mendorong gas sisa pembakaran keluar dari silinder menuju sistem pembuangan. Setelah piston mencapai TMA, siklus kembali ke langkah hisap dan proses berulang secara kontinu selama mesin beroperasi. Secara keseluruhan, dalam satu siklus lengkap diperlukan dua kali putaran poros engkol untuk menghasilkan satu langkah usaha. Efisiensi tinggi mesin diesel diperoleh dari rasio kompresi yang besar serta tidak adanya throttle udara seperti pada mesin bensin. Karena itu, mesin diesel memiliki torsi besar pada putaran rendah dan lebih hemat bahan bakar, sehingga sangat cocok digunakan sebagai penggerak utama pada aplikasi industri dan peralatan berat.

Dalam pengoperasiannya, diesel engine pada XAS 88 dilengkapi dengan sistem pendukung seperti sistem pelumasan, sistem pendinginan cairan, sistem bahan bakar, dan sistem kontrol putaran (governor). Sistem governor berperan penting dalam menjaga kestabilan putaran mesin saat terjadi perubahan beban, misalnya ketika kebutuhan udara meningkat atau menurun. Selain itu, terdapat sistem proteksi seperti sensor tekanan oli dan temperatur pendingin yang akan menghentikan mesin

secara otomatis apabila terjadi kondisi abnormal, guna mencegah kerusakan lebih lanjut.

Penggunaan diesel engine pada kompresor portabel seperti XAS 88 memberikan beberapa keunggulan, antara lain kemandirian dari sumber listrik eksternal, kemampuan bekerja dalam kondisi lingkungan berat, serta efisiensi bahan bakar yang relatif baik untuk aplikasi beban kontinu. Dengan kombinasi antara mesin diesel yang andal dan elemen kompresor rotary screw yang efisien, sistem ini mampu menghasilkan suplai udara bertekanan yang stabil dan kontinu untuk mendukung berbagai peralatan pneumatik di lapangan.

2.2.7 Starting Motor Penggerak Diesel

Starting motor atau motor starter secara umum merupakan perangkat elektromekanis yang berfungsi untuk memulai putaran awal suatu mesin pembakaran dalam. Mesin pembakaran, baik bensin maupun diesel, tidak dapat berputar sendiri dari kondisi diam karena belum terjadi proses pembakaran yang menghasilkan tenaga. Oleh karena itu, diperlukan suatu mekanisme eksternal yang mampu memberikan putaran awal pada poros engkol hingga tercapai kecepatan minimum tertentu agar siklus hisap, kompresi, dan pembakaran dapat berlangsung. Perangkat yang menjalankan fungsi ini adalah motor starter.



Gambar 2.11 Konstruksi Starter Motor

Secara prinsip kerja, motor starter mengubah energi listrik dari baterai menjadi energi mekanik berupa putaran dengan torsi yang besar dalam waktu singkat. Ketika sistem start diaktifkan, arus listrik mengalir menuju motor starter sehingga menghasilkan medan magnet yang memutar armature. Putaran ini kemudian diteruskan melalui mekanisme roda gigi ke flywheel mesin, sehingga poros engkol ikut berputar. Setelah mesin berhasil hidup dan mampu berputar secara

mandiri, sistem starter akan terlepas secara otomatis untuk mencegah kerusakan akibat perbedaan kecepatan putar.

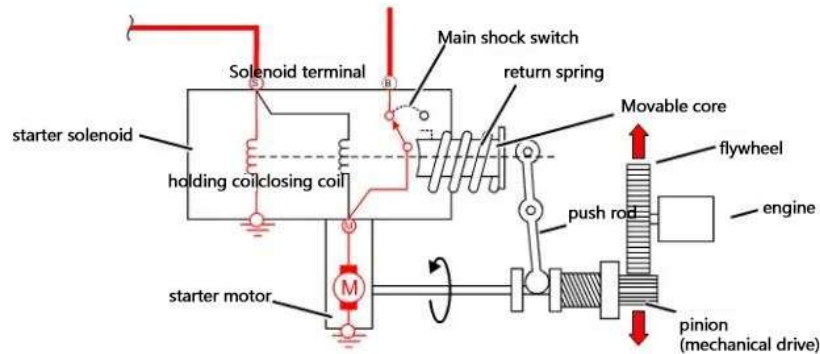
Dalam sistem mesin modern, starting motor biasanya dilengkapi dengan mekanisme penggerak gigi dan sakelar elektromagnetik (solenoid) yang memastikan proses pengaitan dan pelepasan roda gigi berlangsung secara aman dan terkendali. Karena bekerja dengan arus besar dan torsi tinggi, motor starter dirancang dengan konstruksi yang kuat serta hanya beroperasi dalam durasi singkat saat proses penyalaan.

Pada diesel engine yang digunakan pada Atlas Copco XAS 88, starting motor berperan sebagai komponen vital dalam proses awal pengoperasian unit kompresor. Karena mesin diesel memiliki rasio kompresi yang tinggi, poros engkol tidak dapat diputar secara manual dan membutuhkan torsi awal yang besar agar mampu mencapai kecepatan minimum untuk terjadinya pembakaran spontan. Oleh karena itu, starting motor digunakan untuk memberikan putaran awal pada crankshaft sebelum mesin menghasilkan tenaga sendiri.

Ketika operator memutar kunci kontak atau menekan tombol start pada panel kontrol, arus listrik dari baterai dialirkan menuju solenoid starter. Solenoid kemudian mendorong pinion gear untuk berkontak dengan ring gear pada flywheel mesin diesel (umumnya tipe Kubota V1505 pada unit ini). Secara bersamaan, kontak utama tertutup sehingga arus besar mengalir ke motor starter. Motor starter kemudian menghasilkan torsi tinggi yang memutar flywheel dan crankshaft, sehingga piston mulai melakukan langkah hisap dan kompresi. Setelah bahan bakar diinjeksikan dan terjadi pembakaran pertama, mesin mulai hidup dan berputar secara mandiri. Begitu putaran mesin melebihi putaran motor starter, mekanisme kopling satu arah (overrunning clutch) akan mencegah putaran balik dari mesin ke motor starter agar tidak terjadi kerusakan akibat overspeed. Saat tombol start dilepas, arus ke solenoid terputus dan pinion gear kembali ke posisi semula, sehingga motor starter berhenti bekerja.

Dalam aplikasi kompresor portabel seperti XAS 88 yang sering digunakan di lapangan, keandalan starting motor sangat penting karena unit harus mampu dinyalakan dengan cepat dalam berbagai kondisi lingkungan. Sistem ini didukung oleh baterai bertegangan 12 V atau 24 V serta sistem pengisian (alternator) yang

memastikan energi listrik selalu tersedia untuk proses starting berikutnya. Dengan demikian, starting motor pada diesel engine XAS 88 merupakan bagian integral yang menjamin kesiapan operasional kompresor sebelum proses kompresi udara berlangsung.



Gambar 2.12 Mekanisme Starting Motor

Mekanisme kerja starting motor pada mesin diesel pada dasarnya merupakan proses konversi energi listrik menjadi energi mekanik yang dikombinasikan dengan sistem pengaitan roda gigi secara otomatis. Ketika operator mengaktifkan sakelar atau kunci start, arus listrik dari baterai dialirkan menuju solenoid starter. Solenoid ini bekerja sebagai sakelar elektromagnetik sekaligus aktuator mekanis. Saat kumparan solenoid dialiri arus, terbentuk medan magnet yang menarik plunger ke dalam, sehingga mendorong tuas penggerak (shift fork) untuk menggeser pinion gear ke arah flywheel mesin.

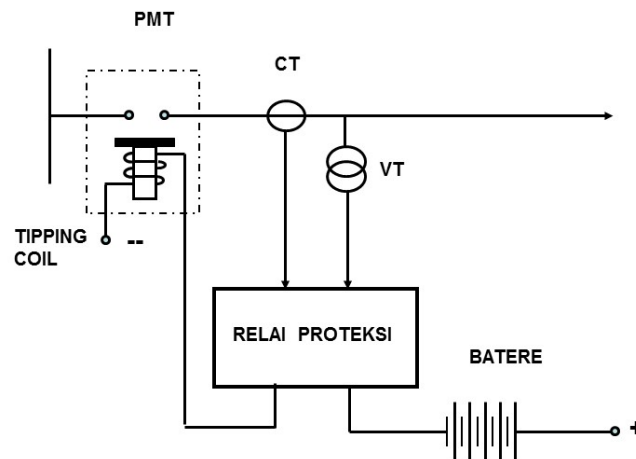
Pada saat pinion gear sudah berkaitan dengan ring gear flywheel, kontak utama di dalam solenoid tertutup sehingga arus listrik besar langsung mengalir ke motor starter. Arus yang besar ini menghasilkan medan magnet kuat pada kumparan medan (field coil) dan armature, sehingga armature berputar dengan torsi tinggi. Putaran armature diteruskan melalui poros motor starter ke pinion gear yang telah terhubung dengan flywheel, sehingga flywheel dan poros engkol mesin ikut berputar. Putaran awal ini memungkinkan terjadinya langkah hisap dan kompresi hingga akhirnya bahan bakar terbakar dan mesin mulai hidup secara mandiri.

Setelah mesin berhasil hidup dan kecepatan putarannya meningkat melebihi putaran motor starter, mekanisme kopling satu arah (overrunning clutch) akan bekerja untuk mencegah putaran balik dari flywheel ke motor starter. Kopling ini

memungkinkan pinion gear berputar bebas jika putaran mesin lebih tinggi, sehingga melindungi motor starter dari kerusakan akibat overspeed. Ketika sakelar start dilepas, arus ke solenoid terputus, medan magnet hilang, dan pegas pengembali menarik plunger serta pinion gear kembali ke posisi semula, sehingga hubungan mekanis antara motor starter dan flywheel terlepas.

2.2.8 Sistem Proteksi

Sistem proteksi secara umum merupakan suatu sistem yang dirancang untuk melindungi peralatan, instalasi, dan manusia dari kondisi abnormal atau berbahaya yang dapat menimbulkan kerusakan, gangguan operasional, maupun risiko keselamatan. Dalam konteks teknik, proteksi tidak hanya terbatas pada jaringan transmisi atau distribusi tenaga listrik, tetapi mencakup seluruh sistem kelistrikan dan sistem teknik lainnya, seperti panel distribusi, motor listrik, generator, transformator, sistem kontrol industri, hingga peralatan berbasis mikrokontroler. Tujuan utama sistem proteksi adalah mendeteksi kondisi tidak normal sedini mungkin, membatasi dampak gangguan, serta mengembalikan sistem ke kondisi aman dengan cara mengisolasi bagian yang bermasalah tanpa mengganggu keseluruhan sistem.



Gambar 2.13 Skema Sistem Proteksi Secara Umum

Secara prinsip kerja, sistem proteksi terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu deteksi, pengambilan keputusan, dan tindakan pengamanan. Tahap deteksi dilakukan dengan mengukur parameter tertentu seperti arus, tegangan, suhu, tekanan, frekuensi, atau kecepatan putaran, tergantung pada jenis sistem yang dilindungi. Sensor atau transduser berfungsi sebagai elemen pengindra yang mengubah besaran fisik menjadi sinyal yang dapat diproses. Selanjutnya, sinyal tersebut dianalisis oleh perangkat

pengolah seperti relai proteksi, modul kontrol, atau sistem berbasis mikroprosesor untuk menentukan apakah kondisi tersebut masih dalam batas normal atau telah melewati ambang batas yang ditetapkan. Apabila terdeteksi kondisi berbahaya, sistem akan mengaktifkan mekanisme pengamanan seperti memutus suplai daya, mengaktifkan alarm, menghentikan mesin, atau mengalihkan beban.

Dalam sistem kelistrikan, bentuk proteksi yang umum dijumpai antara lain proteksi arus lebih (*overcurrent*), hubung singkat (*short circuit*), beban lebih (*overload*), tegangan lebih dan kurang (*over/under voltage*), kebocoran arus ke tanah (*earth leakage*), serta proteksi suhu berlebih (*overtemperature*). Pada instalasi industri, proteksi juga mencakup interlock sistem, proteksi tekanan pada sistem pneumatik atau hidrolik, serta proteksi mekanis pada peralatan berputar. Setiap jenis proteksi dirancang berdasarkan karakteristik risiko dan potensi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tersebut. Agar sistem proteksi bekerja dengan efektif, terdapat beberapa prinsip dasar yang harus dipenuhi, yaitu keandalan (*reliability*), selektivitas (*selectivity*), sensitivitas (*sensitivity*), dan kecepatan (*speed*). Keandalan berarti sistem harus bekerja saat dibutuhkan dan tidak salah operasi saat kondisi normal. Selektivitas mengharuskan hanya bagian yang terganggu saja yang diamankan, sehingga kontinuitas operasi tetap terjaga. Sensitivitas memastikan gangguan kecil pun dapat terdeteksi sebelum berkembang menjadi kerusakan besar, sedangkan kecepatan penting untuk membatasi energi gangguan agar tidak merusak peralatan.

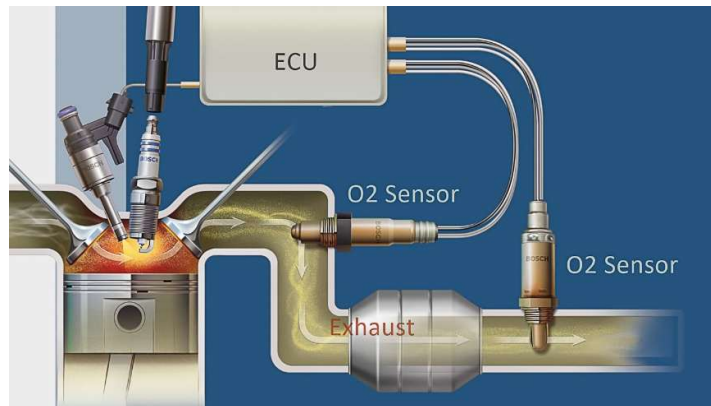
Secara umum, sistem proteksi merupakan bagian integral dari desain sistem teknik modern karena berperan dalam menjaga keselamatan manusia, memperpanjang umur peralatan, mengurangi downtime, dan meningkatkan efisiensi operasional. Oleh karena itu, dalam perancangan suatu sistem baik skala kecil seperti panel kontrol mesin maupun skala besar seperti sistem tenaga analisis risiko dan perencanaan proteksi menjadi tahapan yang tidak dapat dipisahkan dari proses perancangan keseluruhan sistem.

Sistem proteksi pada diesel engine merupakan rangkaian mekanisme pengamanan yang dirancang untuk melindungi mesin dari kerusakan akibat kondisi operasi yang tidak normal. Mesin diesel bekerja pada tekanan, temperatur, dan beban mekanik yang tinggi, sehingga apabila terjadi gangguan seperti kehilangan

pelumasan, *overheating*, atau *overspeed*, kerusakan yang timbul dapat bersifat fatal dan berbiaya besar. Oleh karena itu, sistem proteksi menjadi bagian integral dalam desain dan pengoperasian diesel engine, baik pada genset, alat berat, maupun kompresor portabel seperti Atlas Copco XAS 88.

Sistem proteksi *diesel engine* bekerja dengan prinsip *monitoring* parameter penting mesin secara kontinu melalui sensor. Parameter yang diawasi biasanya meliputi tekanan oli pelumas, temperatur air pendingin, kecepatan putaran mesin (RPM), level bahan bakar, serta terkadang tekanan udara masuk dan temperatur gas buang. Sensor-sensor ini mengirimkan sinyal ke modul kontrol atau panel *engine control unit* (ECU). Apabila nilai parameter melebihi batas aman yang telah ditentukan (set point), sistem akan memberikan peringatan berupa alarm atau langsung melakukan tindakan shutdown otomatis untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

Salah satu proteksi paling penting adalah *low oil pressure protection*. Tekanan oli yang rendah menandakan gangguan pada sistem pelumasan, seperti kebocoran atau kegagalan pompa oli. Jika mesin tetap beroperasi dalam kondisi ini, gesekan antar komponen logam dapat menyebabkan keausan cepat bahkan kerusakan total. Proteksi berikutnya adalah *high coolant temperature protection*, yang bekerja ketika sistem pendingin gagal menjaga temperatur mesin dalam batas normal. *Overheating* dapat menyebabkan deformasi komponen, kerusakan gasket, hingga kegagalan head silinder. Selain itu, terdapat *overspeed protection*, yaitu sistem yang akan menghentikan suplai bahan bakar apabila putaran mesin melebihi batas maksimum yang diizinkan. Kondisi *overspeed* sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan mekanis akibat gaya sentrifugal berlebih pada komponen yang berputar. Pada beberapa aplikasi industri, juga terdapat proteksi tambahan seperti *low fuel level warning*, *air filter restriction indicator*, dan *emergency stop system* yang dapat diaktifkan secara manual saat terjadi kondisi darurat.



Gambar 2.14 Proteksi Engine Diesel

Dalam implementasinya, sistem proteksi dapat bersifat mekanis, elektrik, maupun elektronik. Pada mesin modern, sistem ini umumnya terintegrasi dalam ECU yang mampu melakukan pemantauan digital, pencatatan kesalahan (*fault logging*), dan komunikasi data. Dengan adanya sistem proteksi yang andal, diesel engine dapat beroperasi lebih aman, memiliki umur pakai lebih panjang, serta mengurangi risiko downtime akibat kerusakan berat. Pada sistem elektrikal engine diesel, sistem proteksi dirancang untuk mengamankan rangkaian kelistrikan sekaligus memastikan mesin berhenti secara aman apabila terdeteksi kondisi abnormal. Berbeda dengan proteksi mekanis murni, pada sistem elektrikal seluruh parameter mesin dimonitor oleh sensor yang terhubung ke modul kontrol atau *Engine Control Unit* (ECU). Sistem ini banyak diterapkan pada mesin diesel modern, termasuk yang digunakan pada kompresor portabel seperti Atlas Copco XAS 88 dengan engine tipe Kubota V1505.

Secara umum, proteksi elektrikal engine terdiri dari tiga bagian utama, yaitu sensor, modul kontrol, dan aktuator shutdown. Sensor bertugas mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik, misalnya *pressure switch* untuk tekanan oli, *temperature sensor* untuk suhu coolant, *magnetic pickup* untuk mendeteksi RPM, serta level sensor untuk bahan bakar. Sinyal ini dikirim ke modul kontrol dalam bentuk tegangan atau resistansi tertentu. Modul kontrol kemudian membandingkan nilai tersebut dengan batas aman (*set point*) yang telah diprogram. Apabila terjadi penyimpangan, sistem proteksi akan bekerja dalam dua tahap, yaitu *alarm* dan *shutdown*. Pada tahap alarm, panel akan menampilkan indikator peringatan atau *buzzer* untuk memberi kesempatan operator melakukan tindakan korektif. Jika

parameter melewati batas kritis, modul kontrol akan mengaktifkan aktuator *shutdown*, biasanya dengan memutus suplai bahan bakar melalui *fuel solenoid* atau menghentikan sistem injeksi. Pada beberapa sistem, proteksi juga dapat memutus arus ke relay utama sehingga engine berhenti total.

Selain proteksi parameter mesin, sistem elektrik juga dilengkapi proteksi rangkaian seperti sekering (fuse) dan relay proteksi untuk mencegah kerusakan akibat arus lebih atau hubungan singkat pada *wiring harness*. Sistem pengisian baterai melalui alternator juga dipantau untuk menghindari *overcharge* atau *undercharge* yang dapat mengganggu sistem starter dan kontrol. Sistem proteksi pada elektrik engine bekerja secara terpadu melalui pemantauan sensor, pemrosesan sinyal oleh modul kontrol, serta eksekusi penghentian mesin secara otomatis. Sistem ini tidak hanya melindungi komponen mekanis engine, tetapi juga menjaga keandalan sistem kontrol dan keselamatan operasional secara keseluruhan.

2.2.9 Relay Sebagai Proteksi

Selain proteksi parameter mesin, sistem elektrik juga dilengkapi proteksi rangkaian seperti sekering (fuse) dan relay proteksi untuk mencegah kerusakan akibat arus. Relay proteksi secara umum merupakan perangkat pengaman yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi tidak normal pada suatu sistem dan memberikan perintah kepada peralatan pemutus agar bagian yang terganggu dapat segera diisolasi. Relay ini banyak digunakan dalam sistem kelistrikan, baik pada instalasi skala kecil seperti panel distribusi maupun pada sistem tenaga yang lebih besar. Tujuan utama penggunaan relay proteksi adalah mencegah kerusakan peralatan, menjaga keselamatan manusia, serta mempertahankan kontinuitas operasi sistem.

Secara prinsip kerja, relay proteksi memantau besaran tertentu seperti arus, tegangan, frekuensi, daya, atau impedansi melalui sensor atau. Apabila nilai tersebut melewati ambang batas akibat gangguan seperti hubung singkat, beban lebih, atau tegangan tidak normal, relay akan mengirimkan sinyal *trip* ke *circuit breaker* untuk memutus rangkaian yang terganggu. Proses ini berlangsung secara otomatis dan dalam waktu yang sangat cepat guna membatasi energi gangguan.

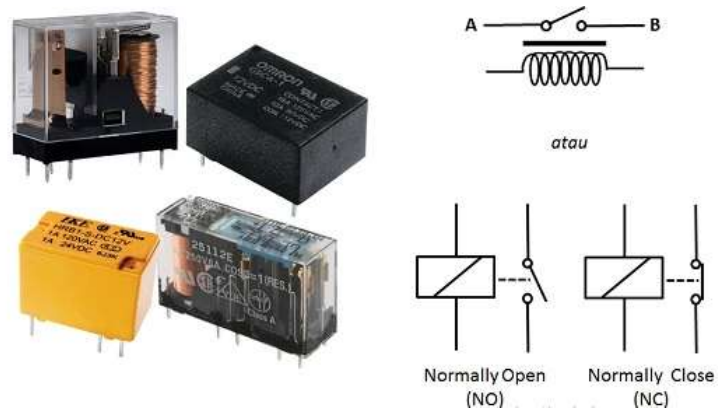


Gambar 2.15 Relay Proteksi

Berdasarkan teknologi kerjanya, relay proteksi dapat dibedakan menjadi relay elektromekanis, relay statis, dan relay digital atau numerik. Relay elektromekanis bekerja berdasarkan prinsip gaya elektromagnetik dan komponen mekanis seperti piringan induksi atau kumparan tarik. Relay statis menggunakan komponen elektronik tanpa bagian bergerak, sedangkan relay numerik menggunakan mikroprosesor yang mampu melakukan pengolahan sinyal secara digital, penyimpanan data gangguan, serta komunikasi dengan sistem kontrol lain. Dalam perancangannya, relay proteksi harus memenuhi beberapa prinsip utama, yaitu selektivitas, keandalan, sensitivitas, dan kecepatan kerja. Selektivitas memastikan hanya bagian yang terganggu saja yang diputus, keandalan menjamin relay bekerja saat diperlukan, sensitivitas memungkinkan deteksi gangguan kecil, dan kecepatan penting untuk membatasi kerusakan akibat arus gangguan yang besar.

Relay proteksi pada diesel engine merupakan bagian dari sistem pengamanan yang berfungsi sebagai elemen pengambil keputusan dalam rangkaian kontrol mesin. Secara umum, relay proteksi pada engine bekerja dengan menerima sinyal dari berbagai sensor seperti tekanan oli, temperatur coolant, dan kecepatan putaran (RPM). Ketika parameter tersebut berada dalam batas normal, relay mempertahankan kondisi rangkaian tetap aktif sehingga mesin dapat beroperasi. Namun apabila terdeteksi kondisi abnormal misalnya tekanan oli turun di bawah batas aman atau temperatur mesin melebihi nilai maksimum relay akan berubah status dan mengirimkan sinyal untuk menghentikan mesin, biasanya dengan memutus suplai bahan bakar melalui fuel shut-off solenoid atau memutus rangkaian

kontrol utama. Dengan demikian, relay proteksi bertindak sebagai pengaman yang mencegah kerusakan mekanis berat akibat kegagalan sistem pelumasan, pendinginan, maupun *overspeed*.



Gambar 2.16 Relay Proteksi Sistem Sirkuit Diesel Engine

Pada mesin diesel modern, fungsi relay proteksi sering terintegrasi dalam modul kontrol elektronik (engine control module). Modul ini menggantikan relay konvensional dengan sistem logika berbasis mikroprosesor, namun secara prinsip tetap sama, yaitu memonitor input sensor dan memberikan *output trip* atau *shutdown* ketika terjadi gangguan. Pada sistem yang lebih sederhana, relay proteksi masih berupa relay elektromekanis yang dihubungkan seri dengan rangkaian kontrol bahan bakar, sehingga ketika kontak relay terbuka akibat sinyal fault, mesin langsung berhenti.

Dalam aplikasi pada kompresor portabel seperti Atlas Copco XAS 88, relay proteksi memiliki peran yang sangat penting karena unit ini bekerja secara mandiri di lapangan dan sering beroperasi dalam kondisi beban kontinu. Mesin diesel yang digunakan, umumnya tipe Kubota V1505, dilengkapi sistem monitoring tekanan oli, temperatur pendingin, serta kecepatan mesin. Relay proteksi atau modul kontrol akan menghentikan engine secara otomatis apabila terjadi *low oil pressure*, *high engine temperature*, atau *overspeed*. Selain itu, sistem juga biasanya terhubung dengan *emergency stop switch* yang secara langsung memutus rangkaian kontrol melalui relay utama.

Pada XAS 88, penghentian mesin akibat proteksi tidak hanya melindungi engine, tetapi juga mencegah kerusakan pada elemen kompresor (*air end*). Jika mesin

terus beroperasi dalam kondisi abnormal, putaran rotor kompresor dapat terganggu, pelumasan tidak optimal, dan temperatur sistem meningkat. Oleh karena itu, relay proteksi dalam sistem ini berfungsi sebagai pengaman terpadu yang menjaga keandalan mesin diesel sekaligus keseluruhan sistem kompresor.

2.2.10 Korelasi *Breakdown* dengan MTBF dan PA

Physical Availability (PA) adalah presentase ukuran seberapa banyak waktu suatu alat atau peralatan tambang benar-benar siap untuk digunakan secara fisik dibandingkan dengan total waktu yang tersedia. Sedangkan *Mean Time Between Failure* (MTBF) adalah indikator yang menggambarkan rata-rata waktu operasional suatu peralatan sebelum mengalami kerusakan atau gangguan [16]. MTBF berfokus pada interval antar kegagalan, sehingga semakin besar nilainya, semakin andal alat tersebut. Jadi *breakdown* yang terjadi di sebuah alat akan mempengaruhi 2 *performance indicator* yaitu MTBF dan PA. MTBF ini bersinggungan dengan frekuensi jumlah *breakdown* yang terjadi, sehingga jika semakin banyak *breakdown* maka nilai MTBF akan semakin menurun, sebaliknya jika jarang terjadi *breakdown* atau bahkan 0, maka MTBF akan semakin meningkat [17]. Namun pada PA yang dilihat adalah *downtime* terjadinya *breakdown* sampai dinyatakan dapat beroperasi kembali dengan aman dan baik, PA ini tidak menghitung frekuensi *breakdown*, sehingga jika banyak *breakdown* tapi *downtime* sedikit, tidak akan menurunkan PA signifikan, selain itu jika *downtime* pekerjaan yang terjadwal (*Breakdown Schedule*) tinggi dan *downtime Breakdown Unschedule* rendah maka akan meningkatkan nilai PA karena dinilai unit tersebut siap untuk beroperasi (tidak rusak).

Dalam dunia pertambangan, kedua konsep ini sangat penting. MTBF membantu tim teknik memahami pola kerusakan dan merencanakan strategi pemeliharaan yang lebih efektif. Misalnya, jika data menunjukkan bahwa sebuah unit rata-rata gagal setiap 500 jam, maka tim bisa menjadwalkan inspeksi atau penggantian komponen sebelum jam ke-500 untuk mencegah kerusakan mendadak. Sedangkan PA memberi gambaran nyata tentang ketersediaan armada. Sebuah alat mungkin punya MTBF tinggi, tetapi jika waktu tunggu suku cadang lama atau pemeliharaan tidak terjadwal dengan baik, PA-nya tetap rendah.

Manfaat penggunaan perhitungan ini dalam pertambangan sangat besar.

Dengan MTBF, perusahaan bisa menekan biaya tak terduga akibat kerusakan mendadak, meningkatkan keselamatan kerja, dan menjaga produktivitas tetap stabil. Dengan PA, manajemen bisa memastikan bahwa target produksi tercapai karena alat benar-benar tersedia sesuai kebutuhan. Kombinasi keduanya membantu perusahaan tambang membuat keputusan yang lebih cerdas: kapan harus melakukan *preventive maintenance*, kapan harus menambah unit baru, atau kapan harus mengganti teknologi yang lebih andal.

Tanpa perhitungan MTBF yang akurat, tim pemeliharaan tidak memiliki gambaran jelas kapan mesin biasanya mengalami kerusakan. Akibatnya, alat bisa tiba-tiba berhenti di tengah operasi, menyebabkan *downtime* tak terduga. *Downtime* ini bukan hanya menghentikan produksi, tetapi juga bisa mengganggu alur kerja keseluruhan, dari pengangkutan material hingga proses pengolahan. Selain itu, jika *Physical Availability* tidak dihitung dengan benar, manajemen akan kesulitan mengetahui seberapa sering alat benar-benar siap digunakan. Misalnya, sebuah unit terlihat jarang rusak, tetapi ternyata sering tidak tersedia karena menunggu suku cadang atau jadwal perawatan yang tidak teratur. Hal ini membuat produktivitas menurun, karena jumlah alat yang siap beroperasi lebih sedikit daripada yang direncanakan.

Risiko lain yang muncul adalah biaya operasional membengkak. Tanpa data MTBF, perusahaan cenderung melakukan perbaikan setelah kerusakan terjadi (*corrective maintenance*) daripada mencegahnya dengan *preventive maintenance*. Biaya perbaikan darurat biasanya jauh lebih tinggi, ditambah lagi dengan kerugian akibat produksi yang terhenti. Begitu juga dengan PA yang tidak terukur dengan baik, perusahaan bisa salah mengalokasikan anggaran untuk armada, membeli unit baru padahal masalah sebenarnya ada pada manajemen pemeliharaan. Hal yang lebih serius, kesalahan dalam perhitungan ini bisa berdampak pada keselamatan kerja. Alat yang rusak mendadak di lapangan berpotensi menimbulkan kecelakaan, baik bagi operator maupun pekerja lain di sekitarnya dan hal inilah yang harus dihindari.