

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Diesel Lokomotif

Mesin diesel adalah salah satu mesin pembakaran dalam atau *internal combustion engine* dimana proses pembakaran dari bahan bakarnya dilakukan di dalam ruang bakar. Pembakaran ini menghasilkan daya untuk menggerakkan lokomotif (Hakim, 2017). Mesin ini ditemukan pada tahun 1892 oleh Rudolf Diesel yang dipatenkan pada tanggal 23 Februari 1893.

Mesin diesel adalah salah satu mesin pembakaran dalam atau internal combustion engine dimana proses pembakaran dari bahan bakarnya dilakukan di dalam ruang bakar. Pembakaran ini menghasilkan daya untuk menggerakkan lokomotif (Hakim, 2017). Mesin ini ditemukan pada tahun 1892 oleh Rudolf Diesel yang dipatenkan pada tanggal 23 Februari 1893. Mesin diesel memiliki peran penting bagi suatu lokomotif, hal ini dikarenakan di dalam mesin diesel tersebut banyak sekali komponen penggerak mesin yang saling berhubungan sehingga menjadikan satu kesatuan yang utuh. Mesin diesel akan terus bergerak dari awal mesin dinyalakan sampai dengan mesin dimatikan, bahkan saat mesin dalam keadaan idle pun, beberapa komponen masih bergerak sesuai kebutuhan seperti generator dan lainnya (Azizah, 2024). Salah satu jenis kendaraan umum yang menggunakan mesin diesel sebagai sumber tenaga yang kemudian menggerakkan roda ialah kereta api. Komponen-komponen dalam mesin diesel saling terhubung dan pada bagian mesin diesel terdapat exhaust yang memiliki fungsi sebagai saluran pembuangan gas emisi. Exhaust terdiri dari beberapa komponen yang mengharuskan untuk tersambung dengan kondisi temperatur yang sangat tinggi sehingga ketahanan material terhadap temperatur sangat penting karena dapat mempengaruhi sifat dan kondisi dari material tersebut (Adriathma, 2021).

2.2 Sistem Filter Udara

Filter udara merupakan salah satu komponen penting dalam berbagai sistem, seperti sistem ventilasi, mesin pembakaran internal, dan alat berat, yang berfungsi untuk menyaring partikel debu, kotoran, dan polutan dari udara sebelum masuk ke

dalam sistem utama (Wijaya, 2025). Dalam sistem mesin diesel lokomotif, filter udara bekerja dalam lingkungan operasional yang berat, dengan tingkat paparan debu dan partikel yang relatif tinggi. Kondisi ini menyebabkan media filter mengalami akumulasi kotoran seiring waktu operasi, yang berdampak pada peningkatan hambatan aliran udara. Peningkatan hambatan tersebut dapat menurunkan suplai udara ke ruang bakar dan memengaruhi efisiensi pembakaran, sehingga diperlukan pengelolaan sistem filter udara yang tepat.

Pengelolaan sistem filter udara mencakup pemilihan jenis filter yang sesuai, pemahaman fungsi filter dalam sistem aliran udara, serta metode perawatan dan pembersihan filter agar kinerjanya tetap optimal. Setiap jenis filter udara memiliki karakteristik dan mekanisme penyaringan yang berbeda, sehingga pemahaman mengenai fungsi dan klasifikasi filter udara menjadi dasar penting dalam perancangan dan analisis sistem pembersih filter udara.

Oleh karena itu, pembahasan mengenai sistem filter udara pada subbab ini akan difokuskan pada fungsi dan jenis filter udara yang umum digunakan pada mesin diesel lokomotif. Pembahasan tersebut disajikan sebagai landasan konseptual untuk memahami peran filter udara dalam sistem pembakaran, yang selanjutnya menjadi dasar dalam analisis kinerja sistem pembersih filter udara otomatis pada penelitian ini.

2.3 Mikrokontroler Arduino Uno dalam Pemodelan Sistem

Arduino UNO merupakan sebuah papan mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO memiliki 14 pin digital input/output, 6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM, 6 input analog, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah power jack, sebuah ICSP header, dan sebuah tombol reset. Mikrokontroler ditunjang oleh arduino UNO sehingga mudah menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya (Adriansyah, 2013).

Arduino UNO sebagai sistem control pengendali utama sistem kendali mendapatkan input dari 2 sensor, yaitu sensor gerak sebagai inputan pertama untuk mendeteksi pergerakan dan selanjutnya Arduino memberikan perintah kepada

sensor cahaya untuk memberikan nilai intensitas pada ruangan, sehingga didapatkan nilai intensitas untuk memberikan pencahayaan kelampu sebagai penerangan ruangan (Rahmadhany, 2024).

Peran Arduino Uno dalam model teoretis meliputi:

- 1) Pemrosesan data masukan dari sensor (dalam bentuk variabel simulasi),
- 2) Penerapan logika kendali ON–OFF atau berbasis ambang batas,
- 3) Pengendalian aktuator pembersih secara konseptual.

Dengan pendekatan ini, Arduino Uno diperlakukan sebagai sistem kendali diskrit yang bekerja berdasarkan kondisi ambang (threshold), sehingga dapat dimodelkan menggunakan persamaan logika dan algoritma sederhana dalam lingkungan simulasi. Keunggulan dari arduino uno sebagai alat pengendali dan memonitoring diantaranya yaitu:

- 1) Bahasa pemrograman yang relatif mudah karena dapat menggunakan bahasa yang sederhana (bahasa pemrograman C)
- 2) Memiliki panduan siap pakai (misalnya shield, GPS, Ethernet)
- 3) Harganya murah dan terjangkau (Gessal, 2019).



Gambar 2. 1 Mikrokontroler Arduino Uno

Sumber: Cara Tekno, 2015

2.4 Sensor dalam Representasi Simulasi

Sensor tekanan diferensial digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan sebelum dan sesudah filter udara, yang mencerminkan tingkat hambatan aliran udara akibat akumulasi partikel. Sensor partikel digunakan untuk mengukur

konsentrasi partikel di udara sebagai indikator tingkat kekotoran filter.

Dalam penelitian ini, karakteristik sensor tidak dianalisis secara detail dari sisi perangkat keras, melainkan digunakan sebagai sumber data input dalam model matematis dan simulasi sistem.

2.4.1 Sensor Kualitas Udara (MQ Series)

Sensor MQ-135 dan MQ-136 dikenal sebagai sensor gas yang sensitif terhadap berbagai jenis gas dan partikel. Dalam penelitian ini, sensor MQ tidak digunakan sebagai perangkat ukur fisik, melainkan sebagai representasi konseptual untuk memodelkan tingkat kontaminasi udara atau penumpukan partikel pada filter. Nilai keluaran sensor direpresentasikan dalam bentuk variabel numerik (misalnya ADC atau konsentrasi relatif), yang mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya partikel debu dalam model simulasi.

2.4.2 Sensor Tekanan Sensor Tekanan Diferensial

Tekanan diferensial merupakan indikator utama hambatan aliran udara pada filter. Dalam model simulasi, tekanan diferensial direpresentasikan sebagai fungsi dari akumulasi partikel pada media filter. Peningkatan tekanan diferensial digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam logika kendali sistem.

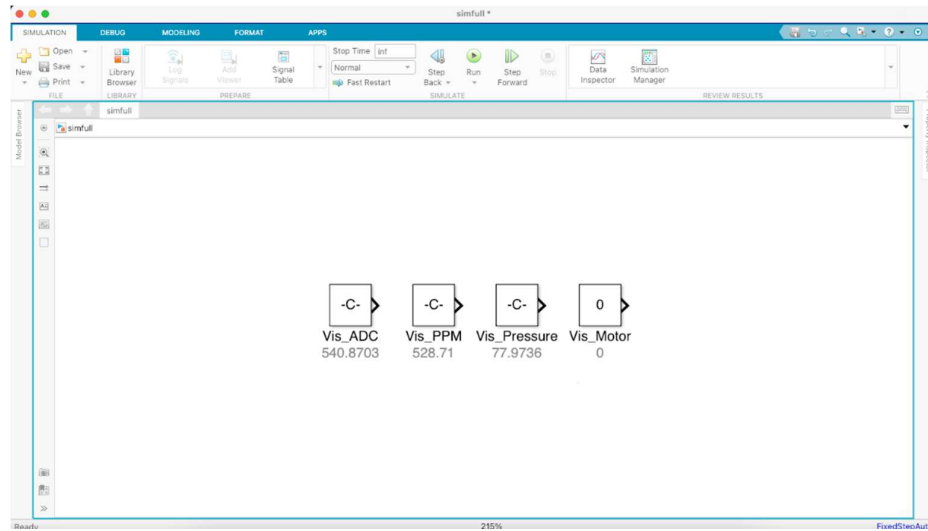
2.5 Pemrograman Matlab

Bahasa pemrograman yang digunakan dalam penelitian ini adalah MATLAB. Pemilihan MATLAB didasarkan pada kemampuannya untuk dijalankan pada sistem operasi Windows, kemudahan dalam perancangan antarmuka pengguna, serta tersedianya berbagai komponen visual yang mendukung proses pengembangan sistem (Ariyadi, 2024).

MATLAB merupakan singkatan dari Mathematics Laboratory atau Matrix Laboratory. Dalam bidang ilmu komputer, MATLAB didefinisikan sebagai bahasa pemrograman yang dirancang untuk melakukan komputasi matematis dengan matriks sebagai struktur data utamanya. Oleh karena itu, MATLAB dikenal sebagai perangkat lunak aplikasi yang andal dalam menyelesaikan berbagai permasalahan matematika secara efisien dan mudah digunakan (Ariyadi, 2024). Selain itu, MATLAB juga banyak dimanfaatkan dalam bidang pendidikan, khususnya untuk keperluan komputasi, pemodelan, simulasi, serta visualisasi data (Werdinginsih,

2022). Dalam penelitian ini, MATLAB digunakan sebagai alat untuk membangun model matematis sistem pembersih filter udara, menjalankan simulasi dinamika sistem, serta menghitung indikator efisiensi dan efektivitas berdasarkan parameter yang ditetapkan.

2.6 Simulasi Sistem



Gambar 2. 2 Simulasi Sistem Pembersih Filter Udara Menggunakan MATLAB

Simulasi sistem merupakan tahapan penting dalam perancangan sistem teknik sebelum dilakukan implementasi pada perangkat keras. Melalui simulasi, perilaku sistem dapat dianalisis berdasarkan kondisi awal dan algoritma kendali yang dirancang, sehingga respon sistem dapat diprediksi secara konseptual. Pendekatan simulasi banyak digunakan untuk meminimalkan kesalahan perancangan dan meningkatkan keandalan sistem sebelum diterapkan secara nyata.

Berdasarkan Gambar 2.2, simulasi sistem pembersih filter udara dimulai dari kondisi awal sistem, yang direpresentasikan oleh kondisi filter udara. Kondisi ini mencerminkan tingkat kekotoran filter yang memengaruhi aliran udara menuju mesin diesel. Udara yang telah melewati filter udara selanjutnya mengalir ke mesin diesel, sehingga kondisi filter udara memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja sistem pemasukan udara dan proses pembakaran mesin.

Kondisi awal sistem tersebut kemudian dimasukkan ke dalam lingkungan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Pada tahap ini, MATLAB berfungsi sebagai media pemodelan dan simulasi untuk merepresentasikan logika kerja sistem pembersih filter udara. Algoritma simulasi dirancang untuk memproses kondisi filter udara dan menganalisis respon sistem terhadap perubahan kondisi tersebut. Penggunaan MATLAB dalam simulasi sistem memungkinkan evaluasi perilaku sistem secara fleksibel dan terstruktur sebelum implementasi dilakukan.

Hasil pemodelan dan pemrosesan dalam MATLAB selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan sistem (system decision). Tahap ini merepresentasikan logika kendali yang menentukan apakah proses pembersihan filter udara perlu diaktifkan atau tidak berdasarkan kondisi sistem. Keputusan sistem ini merupakan inti dari simulasi, karena menggambarkan mekanisme kerja sistem pembersih filter udara secara konseptual.

Respon dari keputusan sistem kemudian ditampilkan dalam bentuk hasil simulasi, yang menggambarkan respon sistem pembersihan filter udara terhadap kondisi awal yang diberikan. Hasil simulasi ini dapat berupa perubahan karakteristik sistem, seperti respon pembersihan dan kecenderungan peningkatan kinerja sistem pemasukan udara. Tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas logika sistem sebelum diterapkan pada perangkat keras.

2.7 Konsep dan Metode Analisis Data

Analisis data adalah tahap fundamental dalam penelitian berbasis simulasi, karena berfungsi sebagai representasi formal dari perilaku sistem yang dikaji. Dalam penelitian ini, pemodelan matematis digunakan untuk menggambarkan hubungan antara variabel-variabel utama pada sistem pembersih filter udara mesin diesel lokomotif secara kuantitatif, sehingga perilaku sistem dapat dianalisis secara sistematis melalui simulasi.

Model matematis yang disusun bersifat konseptual dan disederhanakan, dengan tujuan untuk menangkap karakteristik utama sistem tanpa merepresentasikan seluruh kompleksitas sistem fisik yang sebenarnya. Penyederhanaan model dilakukan secara terkontrol berdasarkan asumsi-asumsi yang relevan, agar simulasi tetap mampu menggambarkan kecenderungan kinerja

sistem secara akurat dari sudut pandang teoretis.

Dalam penelitian ini, pemodelan matematis difokuskan pada dua aspek utama, yaitu perubahan kondisi filter udara yang direpresentasikan melalui tekanan diferensial dan konsentrasi partikel, serta logika kendali sistem pembersih filter udara yang berbasis pada nilai ambang tertentu.

2.7.1 Analisis Efisiensi Sistem

Efisiensi dianalisis sebagai kinerja internal sistem hasil simulasi. Dalam penelitian ini, efisiensi dianalisis melalui beberapa indikator, antara lain:

- a. Efisiensi waktu pembersihan,
- b. Efisiensi penggunaan energi,
- c. Efisiensi penurunan hambatan aliran udara.

Nilai efisiensi dihitung berdasarkan parameter simulasi yang diperoleh dari model matematis sistem. Efisiensi sistem menggambarkan kemampuan sistem berbasis Arduino Uno dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti waktu, energi, dan kinerja fungsional berdasarkan perbandingan terhadap nilai acuan metode manual yang ditetapkan secara teoretis dalam model simulasi. Perbandingan ini tidak didasarkan pada pengujian fisik, melainkan pada parameter asumsi yang digunakan sebagai referensi dalam analisis kinerja sistem. Peningkatan efisiensi menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja lebih cepat, hemat energi, dan memberikan hasil kerja yang lebih baik dengan sumber daya yang sama.

Efisiensi dalam sistem otomasi dapat diukur melalui beberapa indikator utama, antara lain:

A. Efisiensi Waktu Operasional

Efisiensi waktu menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi durasi proses kerja dibandingkan dengan nilai waktu metode manual yang digunakan sebagai acuan teoretis dalam model simulasi. Nilai metode manual tersebut merepresentasikan kondisi kerja konvensional secara konseptual dan digunakan untuk mengevaluasi potensi peningkatan kinerja sistem otomatis. Nilai efisiensi waktu yang besar menunjukkan bahwa sistem Arduino Uno secara teoretis berpotensi mempercepat proses perawatan filter udara berdasarkan hasil simulasi, sehingga waktu perawatan yang direpresentasikan dalam model menjadi lebih singkat.

Perhitungan efisiensi waktu dapat dilakukan dengan rumus:

$$\eta_t = \left(\frac{T_m - T_s}{T_m} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

η_t = efisiensi waktu (%)

T_m = waktu pembersihan secara manual (menit)

T_s = waktu pembersihan menggunakan sistem berbasis Arduino Uno (menit)

Nilai efisiensi waktu yang besar menunjukkan bahwa sistem Arduino mampu mempercepat proses perawatan filter udara, sehingga waktu perawatan kegiatan operasional lokomotif menjadi lebih singkat dan produktivitas kerja meningkat produktif.

Efisiensi waktu mengukur seberapa cepat sistem dapat menyelesaikan proses yang sama dibandingkan dengan metode manual (Muzakki, 2025). Pada penelitian ini, efisiensi waktu dilihat dari seberapa besar sistem dapat mempercepat proses pemeriksaan dan pembersihan filter udara, sehingga waktu perawatan lokomotif menjadi lebih singkat.

B. Efisiensi Energi

Efisiensi energi berkaitan dengan kemampuan sistem untuk menggunakan daya listrik secara optimal (Mulyani, 2018). Efisiensi energi berkaitan dengan kemampuan sistem untuk dalam menggunakan daya listrik secara optimal. Sistem berbasis mikrokontroler Arduino Uno memiliki keunggulan karena membutuhkan tegangan dan arus yang relatif kecil, sehingga konsumsi energi menjadi rendah. Sistem berbasis mikrokontroler seperti Arduino Uno umumnya memiliki konsumsi daya yang rendah, sehingga mampu mendukung kegiatan pemantauan dan pengendalian tanpa meningkatkan beban energi secara signifikan (Kartika, 2019). Perhitungan efisiensi energi dinyatakan dengan rumus:

$$\eta_e = \left(\frac{E_m - E_s}{E_m} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

η_e = efisiensi energi (%)

E_m = energi listrik yang digunakan pada metode manual berdasarkan nilai asumsi teoretis yang ditetapkan dalam model simulasi

E_s = energi listrik yang digunakan sistem berbasis Arduino Uno

Nilai energi pada metode manual tidak diperoleh dari pengukuran lapangan, melainkan ditentukan sebagai parameter referensi dalam simulasi untuk memungkinkan evaluasi potensi penghematan energi sistem berbasis Arduino Uno.

C. Efisiensi Pembersihan Berdasarkan Tekanan Diferensial

Efisiensi ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi hambatan aliran udara akibat penumpukan debu atau partikel pada filter (Susanto, 2024). Efisiensi ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mengurangi hambatan aliran udara akibat penumpukan debu atau partikel kotoran pada filter. Penurunan tekanan diferensial setelah pembersihan menunjukkan peningkatan kemampuan filter dalam melewatkan udara bersih.

Perhitungan efisiensi pembersihan berdasarkan tekanan diferensial dilakukan dengan rumus:

$$\eta_p = \left(\frac{\Delta P_{bef} - \Delta P_{aft}}{\Delta P_{bef}} \right) \times 100\%$$

Keterangan :

η_p = efisiensi pembersihan filter (%)

ΔP_{bef} = tekanan diferensial sebelum permbersihan sistem

ΔP_{aft} = tekanan diferensial sesudah pembersihan sistem

2.7.2 Analisis Efektivitas Sistem

Efektivitas dianalisis berdasarkan pencapaian target pembersihan filter. Dengan demikian, efektivitas tidak hanya dinilai dari kemampuan sistem mendeteksi kondisi filter, tetapi juga dari seberapa besar peningkatan kualitas udara dan efisiensi waktu yang dicapai setelah penerapan sistem berbasis Arduino Uno (Alfirdaus, 2024).

Adapun indikator efektivitas sistem yang digunakan adalah sebagai berikut:

A. Rasio Pembersihan Partikel Udara (*Cleaning Ratio*)

Rasio pembersihan partikel udara menggambarkan seberapa besar penurunan jumlah partikel kontaminan yang terdeteksi oleh sensor sebelum dan sesudah proses pembersihan. Semakin besar penurunan tersebut, semakin efektif sistem dalam membersihkan udara pada filter. Rumus perhitungan rasio pembersihan adalah:

$$R_c = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

R_c = rasio pembersihan partikel udara (%)

C_1 = konsentrasi partikel sebelum pembersihan (ppm atau $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_2 = konsentrasi partikel setelah pembersihan (ppm atau $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Nilai C_1 dan C_2 diperoleh dari hasil pembacaan sensor udara (misalnya sensor MQ). Nilai R_c yang tinggi menunjukkan bahwa sistem berhasil menurunkan konsentrasi partikel udara secara signifikan, menandakan efektivitas pembersihan baik.

B. Efektivitas Aliran Udara (*Airflow*)

Efektivitas aliran udara menunjukkan kemampuan sistem untuk mengembalikan debit aliran udara (airflow rate) yang melewati filter setelah proses pembersihan dilakukan. Semakin besar peningkatan aliran udara, semakin efektif sistem dalam menghilangkan hambatan akibat debu pada filter. Rumus perhitungan efektivitas aliran udara adalah:

$$\eta_{air} = \frac{Q_{aft} - Q_{bef}}{Q_{bef}} \times 100\%$$

Keterangan:

H_{air} = afektivitas peningkatan aliran udara (%)

Q_{bef} = debit aliran udara sebelum pembersihan (m^3/min)

Q = debit aliran udara setelah pembersihan (m^3/min)

C. Responsivitas Sensor MQ

Responsivitas sensor MQ mengukur seberapa cepat dan akurat sensor mendeteksi perubahan konsentrasi partikel atau gas pada filter udara. Indikator ini penting untuk memastikan sistem dapat memberikan informasi real time tentang kondisi filter. Perhitungan responsivitas sensor MQ dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$T_{respon} = t_{deteksi} - t_{start}$$

Keterangan:

T_{respon} = waktu respon sensor (detik)

$t_{deteksi}$ = waktu sensor MQ menunjukkan hasil tabil

t_{start} = waktu sensor MQ memberikan pembacaan pertama

D. Keandalan Sistem

Keandalan menunjukkan sejauh mana sistem dapat bekerja secara konsisten tanpa mengalami kesalahan fungsi. Sistem berbasis Arduino Uno harus mampu memproses data sensor secara stabil dan memberikan informasi yang akurat untuk mendukung pengambilan keputusan perawatan (Setiawan, 2025). Perhitungan keandalan sistem dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$R_{sys} = \frac{N_{berhasil}}{N_{total}} \times 100\% = 100\%$$

Keterangan :

$N_{berhasil}$ = Jumlah siklus simulasi yang berhasil dijalankan sesuai logika sistem.

N_{total} = Jumlah seluruh siklus simulasi yang diuji

