

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem monitoring tekanan udara pada kompresor berbasis mikrokontroler merupakan salah satu topik yang banyak dikembangkan dalam bidang otomasi industri dan sistem pneumatik. Sistem monitoring yang baik harus mampu melakukan pengukuran tekanan secara akurat, menampilkan informasi secara *real-time*, serta mengendalikan proses pengisian udara secara otomatis agar sistem bekerja lebih efisien dan aman. Selain itu, perkembangan teknologi mikrokontroler seperti ESP32 memungkinkan sistem monitoring tidak hanya menampilkan data secara lokal, tetapi juga dapat diintegrasikan dengan sistem Internet of Things (IoT). Oleh karena itu, sebelum melakukan perancangan sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis pada kompresor D25WZ1, diperlukan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan. Kajian tersebut bertujuan untuk memahami metode, teknologi yang digunakan, hasil yang diperoleh, serta mengetahui kekurangan dari penelitian sebelumnya sehingga dapat dijadikan dasar dalam pengembangan sistem yang lebih baik.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kukuh Wahyu Budi Kusumawardana, Irianto, dan Mohammad Zaenal Efendi dengan judul "Rancang Bangun Sistem Kontrol pada Kompresor Tekanan Udara sebagai Pengisi Udara untuk Ban Kendaraan", dijelaskan bahwa sistem kontrol kompresor dirancang untuk meningkatkan efisiensi proses pengisian udara pada ban kendaraan melalui pengaturan tekanan secara otomatis. Sistem menggunakan sensor tekanan sebagai masukan bagi mikrokontroler untuk mengendalikan inverter satu fasa dengan metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) serta katup solenoid sebagai aktuator untuk membuang tekanan apabila melebihi nilai *setting point*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengisian udara hanya dalam satu kali proses dengan selisih tekanan sekitar 1,5 psi dari nilai yang diatur sehingga proses menjadi lebih efisien dibandingkan metode manual.

Meskipun demikian, penelitian ini masih berfokus pada sistem kontrol kompresor dan belum menyediakan fitur monitoring tekanan secara *real-time*, penyimpanan data, maupun komunikasi berbasis Internet of Things (IoT).

2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Danci Ngaibawar, Haslinda H.S., dan M. Ilham Nur dengan judul "Rancang Bangun Sistem Pengisian Tabung Udara Bertekanan dengan Silinder Pneumatik", dijelaskan bahwa sistem dirancang untuk menghasilkan udara bertekanan dengan memanfaatkan energi mekanik dari kendaraan yang melintasi pelat pijakan sehingga tidak memerlukan tenaga listrik maupun bahan bakar. Sistem menggunakan mekanisme silinder pneumatik yang dihubungkan dengan pelat pijakan untuk menghasilkan udara bertekanan yang kemudian disimpan ke dalam tabung penyimpanan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan tekanan rata-rata sebesar 0,53 bar pada langkah maju torak dan 0,33 bar pada langkah mundur torak. Penelitian ini berhasil menunjukkan konsep pemanfaatan energi alternatif yang sederhana dan hemat energi. Akan tetapi, sistem yang dikembangkan masih berorientasi pada aspek mekanik dan belum dilengkapi sistem monitoring tekanan otomatis menggunakan mikrokontroler maupun tampilan digital sehingga kondisi tekanan udara belum dapat dipantau secara langsung oleh pengguna.
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh M. S. Firmansyah dan A. Wisaksono dengan judul "Compressor Monitoring System Using ESP32 and Google Sheet at PT. AFS", dijelaskan bahwa sistem monitoring memanfaatkan mikrokontroler ESP32 untuk membaca data sensor pada kompresor kemudian mengirimkannya ke Google Sheets secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan mampu mempermudah proses pemantauan kondisi kompresor dan penyimpanan data secara otomatis sehingga operator dapat melakukan pengawasan tanpa pencatatan manual. Akan tetapi, penelitian tersebut lebih berfokus pada proses monitoring data dan belum

mengimplementasikan sistem pengendalian otomatis terhadap proses pengisian udara berdasarkan nilai tekanan yang telah ditentukan.

4. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh J. S. Tutuko, A. Prawoto, D. Ratnaningsih, A. E. Kristiyono, dan S. D. Robbi dengan judul " ", dijelaskan bahwa ESP32 digunakan sebagai pusat kendali untuk melakukan monitoring kondisi kompresor secara *real-time*. Sistem mampu menampilkan data hasil pengukuran sehingga memudahkan pengguna dalam mengetahui kondisi kerja kompresor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ESP32 dapat meningkatkan efektivitas proses monitoring dengan biaya implementasi yang relatif rendah. Namun demikian, penelitian tersebut masih lebih menitikberatkan pada monitoring kondisi kompresor dan belum mengembangkan sistem kontrol otomatis tekanan udara menggunakan *pressure transducer*.
5. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Breno Santos Oliveira dengan judul "*Development and Implementation of a Remote IoT Monitoring System Applied to a Pneumatic Compressor*", dijelaskan bahwa sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) mampu melakukan pemantauan kondisi kompresor dari jarak jauh melalui jaringan internet. Sistem yang dikembangkan memungkinkan pengguna memperoleh informasi kondisi peralatan secara *real-time* sehingga proses pemeliharaan menjadi lebih efektif. Akan tetapi, penelitian tersebut belum mengintegrasikan fungsi pengendalian otomatis pada proses pengisian udara maupun pengaturan tekanan berdasarkan nilai *setting point*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kompresor D25WZ1



Gambar 2- 1 Kompresor D25WZ1

Kompresor merupakan perangkat mekanis yang berfungsi menghasilkan udara bertekanan dengan cara memampatkan udara dari lingkungan sehingga volumenya berkurang dan tekanannya meningkat. Udara bertekanan tersebut kemudian dimanfaatkan sebagai sumber energi pada berbagai sistem, seperti otomasi industri, peralatan bengkel, hingga sistem pneumatik. Dibandingkan sumber tenaga lainnya, udara bertekanan memiliki beberapa keunggulan, di antaranya lebih bersih, mudah diperoleh, tidak mudah terbakar, serta relatif aman digunakan pada lingkungan kerja industri. Oleh karena itu, kompresor menjadi salah satu komponen utama dalam sistem pneumatik karena berperan sebagai penyedia energi untuk mengoperasikan berbagai aktuator pneumatik [3][5].

Secara umum, kompresor dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu *positive displacement compressor* dan *dynamic compressor*. *Positive displacement compressor* bekerja dengan menjebak sejumlah udara di dalam ruang kompresi, kemudian mengurangi volumenya sehingga tekanan udara meningkat. Salah satu jenis yang paling banyak digunakan adalah *reciprocating compressor* atau kompresor torak yang menggunakan gerakan bolak-balik piston di dalam silinder untuk melakukan proses kompresi udara. Sementara itu, *dynamic compressor* meningkatkan tekanan udara dengan memanfaatkan energi kinetik yang dihasilkan oleh impeller berkecepatan tinggi. Kompresor D25WZ1 yang digunakan pada penelitian ini termasuk ke dalam jenis *reciprocating*

compressor karena proses kompresinya memanfaatkan mekanisme piston yang digerakkan oleh motor listrik.

Kompresor D25WZ1 bekerja menggunakan motor listrik satu fasa yang menggerakkan poros engkol (*crankshaft*). Putaran poros tersebut diubah menjadi gerakan bolak-balik piston sehingga udara dari lingkungan dapat dihisap melalui katup masuk, kemudian dimampatkan di dalam silinder dan dialirkan menuju tabung penyimpanan melalui katup keluar. Proses tersebut berlangsung secara berulang hingga tekanan udara di dalam tabung mencapai nilai yang diinginkan. Berdasarkan spesifikasi produk, kompresor D25WZ1 umumnya beroperasi pada tegangan 220 VAC, memiliki tekanan kerja maksimum sekitar 8 bar serta dilengkapi dengan *pressure switch*, *pressure gauge*, dan *safety valve* sebagai sistem pengaman ketika tekanan melebihi batas kerja yang telah ditentukan. Karakteristik tersebut membuat kompresor ini banyak digunakan pada aplikasi pneumatik berkapasitas kecil hingga menengah.

Dalam penelitian ini, kompresor D25WZ1 berfungsi sebagai sumber utama udara bertekanan untuk mengoperasikan silinder pneumatik pada mesin stempel. Berbeda dengan sistem konvensional yang masih dioperasikan secara manual, kompresor pada penelitian ini dikendalikan secara otomatis menggunakan mikrokontroler ESP32. Nilai tekanan udara di dalam tabung dipantau secara *real-time* menggunakan sensor tekanan G1/4. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi kerja kompresor. Apabila tekanan udara berada di bawah batas minimum yang telah ditentukan, sistem akan mengaktifkan relay sehingga kompresor mulai melakukan pengisian udara. Sebaliknya, ketika tekanan telah mencapai nilai maksimum (*set point*), relay akan memutus suplai listrik ke kompresor sehingga proses pengisian berhenti secara otomatis. Mekanisme ini membantu menjaga kestabilan tekanan udara sekaligus mengurangi konsumsi energi akibat kompresor bekerja secara terus-menerus.

Pemilihan kompresor D25WZ1 pada penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan, yaitu memiliki ukuran yang relatif ringkas, tekanan kerja yang

sesuai untuk kebutuhan mesin stempel pneumatik skala kecil, serta mudah diperoleh dengan harga yang lebih ekonomis dibandingkan kompresor industri berkapasitas besar. Selain itu, kompresor ini juga mudah diintegrasikan dengan sensor tekanan, modul relay, dan mikrokontroler ESP32 sehingga mendukung penerapan sistem monitoring tekanan pengisian udara secara otomatis. Dengan adanya integrasi tersebut, kondisi tekanan udara dapat dipantau secara langsung melalui LCD, sementara proses pengisian udara berlangsung secara otomatis sesuai dengan nilai tekanan yang telah ditentukan. Sistem ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi kerja, mengurangi keterlibatan operator, serta menjaga kestabilan tekanan udara selama mesin stempel pneumatik beroperasi.

2.2.2 Tabung Freon AC



Gambar 2- 2 Tabung Freon AC

Tabung freon AC merupakan wadah bertekanan (*pressure vessel*) yang pada awalnya dirancang untuk menyimpan refrigeran, seperti R-22, R-32, maupun R-410A, selama proses distribusi dan pengisian sistem pendingin udara. Tabung ini umumnya dibuat dari baja karbon berkekuatan tinggi yang mampu menahan tekanan internal sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku. Selain memiliki kekuatan mekanik yang baik, tabung freon juga dirancang agar tahan terhadap korosi dan perubahan tekanan selama proses penyimpanan maupun pengangkutan refrigeran. Karakteristik tersebut menyebabkan tabung freon tidak hanya dimanfaatkan dalam sistem pendingin, tetapi juga banyak digunakan

sebagai tabung penyimpanan udara bertekanan pada berbagai aplikasi penelitian maupun industri skala kecil setelah melalui proses modifikasi yang sesuai dengan aspek keselamatan.[4] [7].

Pada penelitian ini, tabung freon AC tidak lagi digunakan sebagai tempat penyimpanan refrigeran, melainkan dimanfaatkan sebagai tabung penyimpanan udara bertekanan yang dihasilkan oleh kompresor D25WZ1. Udara hasil kompresi akan dialirkan menuju tabung hingga mencapai tekanan yang telah ditentukan. Selanjutnya, udara tersebut digunakan sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan silinder pneumatik pada mesin stempel. Selama proses pengisian berlangsung, sensor tekanan akan membaca kondisi tekanan udara di dalam tabung secara kontinu dan mengirimkan data tersebut ke ESP32. Berdasarkan data tersebut, mikrokontroler akan mengendalikan kerja kompresor melalui modul relay sehingga proses pengisian udara berlangsung secara otomatis sesuai dengan nilai *set point* yang telah ditentukan. Dengan adanya sistem ini, tekanan udara di dalam tabung dapat dipertahankan tetap stabil sehingga performa sistem pneumatik menjadi lebih baik.

Pemanfaatan tabung freon AC sebagai tabung penyimpanan udara pada penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan, yaitu memiliki konstruksi yang kuat, mudah diperoleh, biaya yang relatif ekonomis, serta memiliki dimensi yang sesuai untuk mesin stempel pneumatik skala kecil. Meskipun demikian, penggunaan tabung freon sebagai tabung udara harus memperhatikan kondisi fisik tabung sebelum digunakan, seperti memastikan tidak terdapat korosi, retakan, deformasi, maupun kerusakan pada sambungan las yang dapat mengurangi kemampuan tabung dalam menahan tekanan internal. Selain itu, tekanan kerja sistem harus tetap berada di bawah batas tekanan maksimum yang direkomendasikan agar keamanan pengoperasian tetap terjaga. Dengan mempertimbangkan aspek tersebut, tabung freon AC dapat menjadi alternatif *air receiver* yang efektif untuk mendukung sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis yang dikembangkan pada penelitian ini.

2.2.3 Solenoid Valve



Gambar 2- 3 Solenoid Valve

Solenoid valve merupakan katup elektromekanis yang digunakan untuk mengatur aliran fluida, baik berupa udara, gas, maupun cairan, dengan memanfaatkan gaya elektromagnetik sebagai penggerakannya. Komponen ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu solenoid yang berfungsi menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus listrik dan badan katup (*valve body*) yang mengatur jalur aliran fluida. Dibandingkan katup manual, solenoid valve memiliki keunggulan berupa waktu respon yang cepat, pengoperasian yang mudah, serta dapat diintegrasikan dengan sistem kendali otomatis. Oleh karena itu, solenoid valve banyak diterapkan pada sistem pneumatik, sistem hidrolik, proses otomasi industri, maupun berbagai peralatan yang membutuhkan pengendalian aliran fluida secara otomatis.[5] [7].

Prinsip kerja solenoid valve didasarkan pada perubahan energi listrik menjadi energi magnet. Ketika kumparan (*coil*) pada solenoid dialiri arus listrik, akan terbentuk medan magnet yang menarik inti besi (*plunger*) ke arah kumparan. Pergerakan plunger tersebut menyebabkan katup terbuka atau tertutup sesuai

dengan jenis solenoid valve yang digunakan. Sebaliknya, ketika arus listrik dihentikan, pegas (*spring*) akan mengembalikan plunger ke posisi semula sehingga kondisi katup kembali seperti keadaan awal. Berdasarkan kondisi normalnya, solenoid valve dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Normally Closed* (NC) dan *Normally Open* (NO). Pada tipe NC, katup akan tetap tertutup ketika tidak mendapat suplai listrik dan baru terbuka saat kumparan dialiri arus. Sebaliknya, tipe NO akan tetap terbuka pada kondisi tanpa arus listrik dan menutup ketika kumparan diberi tegangan [6].

Pada penelitian ini, solenoid valve berfungsi sebagai komponen pengendali aliran udara bertekanan menuju silinder pneumatik pada mesin stempel. Setelah udara dihasilkan oleh kompresor D25WZ1 dan disimpan di dalam tabung penampung, udara tersebut akan dialirkan menuju silinder melalui solenoid valve. Pembukaan dan penutupan katup dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 melalui modul relay sesuai dengan logika program yang telah dirancang. Ketika sistem menerima perintah untuk melakukan proses penekanan, ESP32 akan mengaktifkan relay sehingga solenoid valve membuka jalur udara menuju silinder pneumatik. Sebaliknya, setelah proses penekanan selesai, relay akan dimatikan sehingga katup kembali ke posisi awal dan aliran udara dihentikan atau dialihkan sesuai dengan konfigurasi katup yang digunakan. Dengan mekanisme tersebut, pergerakan silinder menjadi lebih presisi dan dapat dikendalikan secara otomatis.

Penggunaan solenoid valve pada penelitian ini memberikan beberapa keuntungan, antara lain meningkatkan kecepatan respon sistem, mengurangi pengoperasian katup secara manual, serta mendukung proses otomasi pada mesin stempel pneumatik. Selain itu, integrasi antara solenoid valve, sensor tekanan, dan mikrokontroler ESP32 memungkinkan sistem bekerja secara lebih efisien karena aliran udara hanya diberikan ketika dibutuhkan. Hal ini tidak hanya membantu menjaga kestabilan tekanan udara di dalam sistem, tetapi juga dapat mengurangi pemborosan energi akibat kebocoran atau penggunaan udara yang tidak diperlukan. Dengan demikian, solenoid valve menjadi salah satu

komponen penting yang mendukung keberhasilan sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis yang dikembangkan dalam penelitian ini.

2.2.4 Pneumatik Silinder



Gambar 2- 4 Pneumatik Silinder

Silinder pneumatik merupakan salah satu aktuator pada sistem pneumatik yang berfungsi mengubah energi udara bertekanan menjadi energi mekanik berupa gerakan linier. Komponen ini banyak digunakan pada sistem otomasi industri karena memiliki konstruksi yang sederhana, kecepatan kerja yang tinggi serta mudah diintegrasikan dengan berbagai sistem kendali. Dibandingkan aktuator elektrik maupun hidrolik silinder pneumatik memiliki keunggulan berupa biaya perawatan yang relatif rendah dan tidak menghasilkan percikan api sehingga aman digunakan pada lingkungan yang mudah terbakar. Silinder pneumatik banyak diaplikasikan pada mesin produksi sistem pengemasan, mesin perakitan, hingga mesin stempel yang membutuhkan gerakan maju dan mundur secara berulang. [5] [7]

Prinsip kerja silinder pneumatik didasarkan pada tekanan udara yang diberikan ke dalam ruang silinder untuk menghasilkan gaya dorong pada piston. Ketika udara bertekanan dialirkan ke salah satu sisi piston, tekanan tersebut akan mendorong piston sehingga batang piston (*piston rod*) bergerak keluar. Sebaliknya, apabila udara dialirkan ke sisi lainnya, piston akan bergerak kembali

ke posisi semula. Besarnya gaya yang dihasilkan dipengaruhi oleh tekanan udara dan luas penampang piston, sehingga semakin besar tekanan udara yang diberikan maka semakin besar pula gaya dorong yang dihasilkan. Hubungan tersebut menjadikan tekanan udara sebagai salah satu parameter penting yang harus dijaga agar kinerja silinder tetap optimal selama proses kerja berlangsung.

Berdasarkan cara kerjanya, silinder pneumatik dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *single acting cylinder* dan *double acting cylinder*. *Single acting cylinder* hanya memanfaatkan tekanan udara untuk menggerakkan piston ke satu arah, sedangkan gerakan kembali dibantu oleh pegas (*spring*). Jenis ini umumnya digunakan pada aplikasi yang membutuhkan gaya dorong satu arah dengan konstruksi yang sederhana. Sementara itu, *double acting cylinder* menggunakan tekanan udara pada kedua sisi piston sehingga mampu menghasilkan gerakan maju maupun mundur secara penuh tanpa bantuan pegas. Dibandingkan *single acting cylinder*, tipe *double acting* memiliki gaya yang lebih besar, gerakan yang lebih stabil, serta lebih banyak digunakan pada aplikasi otomasi industri karena mampu bekerja secara terus-menerus dengan tingkat presisi yang lebih baik.

Pada penelitian ini digunakan silinder pneumatik sebagai aktuator utama yang menghasilkan gerakan penekanan pada mesin stempel. Udara bertekanan yang dihasilkan oleh kompresor D25WZ1 terlebih dahulu disimpan di dalam tabung penampung, kemudian dialirkan menuju silinder melalui solenoid valve. Pembukaan dan penutupan solenoid valve dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 sehingga pergerakan silinder dapat berlangsung secara otomatis sesuai dengan logika program yang telah dirancang. Ketika tombol operasi ditekan, ESP32 akan mengaktifkan relay untuk membuka solenoid valve sehingga udara bertekanan masuk ke dalam silinder dan mendorong piston melakukan proses penekanan. Setelah proses selesai, aliran udara dialihkan sehingga piston kembali ke posisi awal dan siap digunakan untuk siklus berikutnya.

Pemilihan silinder pneumatik pada penelitian ini didasarkan pada kemampuannya menghasilkan gaya tekan yang stabil dengan waktu respon yang

cepat. Selain itu, penggunaan aktuator pneumatik juga mendukung sistem monitoring tekanan yang dikembangkan karena besarnya gaya yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh tekanan udara di dalam sistem. Oleh sebab itu, kestabilan tekanan menjadi faktor penting yang harus dijaga agar proses penekanan pada mesin stempel berlangsung secara konsisten. Integrasi antara kompresor, tabung penampung udara, sensor tekanan G1/4, solenoid valve, dan silinder pneumatik memungkinkan sistem bekerja secara otomatis dengan tekanan yang tetap berada pada rentang kerja yang telah ditentukan. Dengan demikian, performa mesin stempel menjadi lebih stabil, efisien, dan memiliki tingkat keandalan yang lebih baik dibandingkan sistem yang masih dioperasikan secara manual.

2.2.5 Stempel



Gambar 2- 5 Stempel

Stempel merupakan alat yang digunakan untuk memberikan tanda, simbol, tulisan, maupun pola tertentu pada suatu media melalui proses penekanan. Dalam perkembangannya, penggunaan stempel tidak hanya terbatas pada dokumen administrasi, tetapi juga telah banyak diterapkan pada proses produksi di bidang industri, seperti pencetakan logo, penandaan produk (*marking*), embossing, maupun pembentukan material. Kualitas hasil penekanan sangat dipengaruhi oleh besarnya gaya tekan, waktu penekanan, serta kestabilan posisi stempel selama proses berlangsung. Oleh karena itu, pada sistem industri

modern proses penekanan umumnya dilakukan menggunakan aktuator mekanis, hidrolik, atau pneumatik agar hasil yang diperoleh lebih seragam dan konsisten.

Pada mesin stempel pneumatik, gaya penekanan dihasilkan oleh silinder pneumatik yang memanfaatkan udara bertekanan sebagai sumber energi. Ketika udara bertekanan dialirkan ke dalam silinder melalui solenoid valve, piston akan bergerak maju dan mendorong kepala stempel hingga menyentuh permukaan benda kerja. Setelah proses penekanan selesai, aliran udara dialihkan sehingga piston kembali ke posisi semula dan sistem siap melakukan siklus berikutnya. Dibandingkan dengan sistem penekanan manual, penggunaan aktuator pneumatik mampu menghasilkan gaya yang lebih stabil, waktu kerja yang lebih cepat, serta mengurangi kelelahan operator karena seluruh proses berlangsung secara otomatis [1] [7]

Pada penelitian ini, stempel merupakan komponen keluaran *end effector* yang berfungsi memberikan tekanan pada objek kerja dengan memanfaatkan gaya yang dihasilkan oleh silinder pneumatik. Seluruh proses penekanan dilakukan secara otomatis melalui integrasi antara kompresor D25WZ1, tabung penampung udara, sensor tekanan G1/4, mikrokontroler ESP32, modul relay, dan solenoid valve. Ketika tekanan udara di dalam tabung telah mencapai nilai yang ditentukan, sistem akan mengaktifkan solenoid valve sehingga udara bertekanan menggerakkan silinder pneumatik untuk melakukan proses penekanan. Dengan sistem tersebut, gaya tekan yang diterima oleh stempel menjadi lebih stabil karena tekanan udara selalu dipantau dan dijaga pada rentang kerja yang telah ditentukan.

Penggunaan sistem stempel pneumatik pada penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi proses kerja sekaligus memperoleh hasil penekanan yang lebih konsisten dibandingkan metode manual. Selain mengurangi ketergantungan terhadap tenaga operator, sistem ini juga memungkinkan proses penekanan dilakukan secara berulang dengan kualitas yang relatif seragam. Keberadaan sistem monitoring tekanan berbasis ESP32 memberikan keuntungan tambahan karena operator dapat mengetahui kondisi tekanan udara secara *real-*

time melalui LCD. Apabila terjadi penurunan tekanan yang dapat memengaruhi kualitas penekanan, sistem dapat segera melakukan pengisian udara secara otomatis sehingga proses kerja tetap berlangsung secara optimal sesuai dengan kebutuhan mesin stempel pneumatik skala kecil.

2.2.6 Mikrokontroler

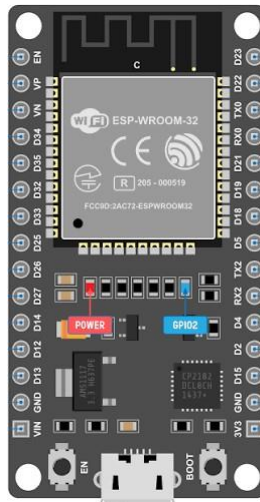
Mikrokontroler merupakan suatu sistem komputer berukuran kecil yang dirancang dalam satu chip terpadu (*integrated circuit*) dan berfungsi sebagai pusat pengendali pada suatu sistem elektronik. Di dalam sebuah mikrokontroler telah terintegrasi unit pemroses (*Central Processing Unit/CPU*), memori serta berbagai perangkat masukan dan keluaran (*Input/Output* atau *I/O*) sehingga mampu menjalankan program untuk mengendalikan suatu proses secara otomatis. Berbeda dengan mikroprosesor yang memerlukan komponen eksternal seperti memori dan antarmuka tambahan, mikrokontroler telah dirancang sebagai sistem yang lengkap sehingga lebih sederhana, hemat daya, dan mudah diterapkan pada sistem tertanam (*embedded system*). Oleh karena itu, mikrokontroler banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti otomasi industri, robotika, sistem monitoring, peralatan rumah tangga, hingga perangkat Internet of Things (IoT).

Prinsip kerja mikrokontroler diawali dengan menerima data dari berbagai perangkat masukan, seperti sensor, saklar, maupun modul komunikasi. Data tersebut kemudian diproses oleh CPU berdasarkan program yang telah disimpan di dalam memori. Hasil pengolahan data selanjutnya dikirimkan ke perangkat keluaran, seperti relay, motor, LCD, maupun aktuator lainnya untuk menjalankan fungsi tertentu sesuai dengan logika program. Seluruh proses tersebut berlangsung secara terus-menerus dengan kecepatan yang tinggi sehingga mikrokontroler mampu melakukan proses pemantauan dan pengendalian secara *real-time*. Kemampuan ini menjadikan mikrokontroler sebagai komponen utama dalam berbagai sistem kendali otomatis yang membutuhkan respon cepat dan tingkat akurasi yang tinggi.

Dalam penelitian ini, mikrokontroler berperan sebagai pusat kendali yang mengoordinasikan seluruh proses monitoring dan pengendalian tekanan udara pada kompresor. Mikrokontroler menerima data tekanan dari sensor G1/4 Pressure Transducer dan data berat dari sensor load cell melalui modul HX711. Data tersebut kemudian diolah untuk menentukan kondisi kerja sistem berdasarkan program yang telah dirancang. Selanjutnya, mikrokontroler akan mengendalikan modul relay untuk mengaktifkan atau mematikan kompresor, mengendalikan solenoid valve sebagai pengatur aliran udara, serta menampilkan informasi kondisi sistem pada LCD. Dengan adanya proses pengolahan data secara otomatis, sistem mampu menjaga tekanan udara tetap berada pada rentang kerja yang telah ditentukan sehingga proses pengoperasian mesin stempel menjadi lebih stabil dan efisien.

Penggunaan mikrokontroler pada penelitian ini memberikan beberapa keuntungan dibandingkan sistem kendali konvensional. Selain mampu mengintegrasikan berbagai sensor dan aktuator dalam satu sistem, mikrokontroler juga memungkinkan perubahan logika kerja dilakukan melalui perangkat lunak tanpa perlu mengubah rangkaian elektronik secara signifikan. Fleksibilitas tersebut memudahkan proses pengembangan maupun penyempurnaan sistem apabila di kemudian hari diperlukan penambahan fitur baru. Oleh karena itu, mikrokontroler menjadi komponen yang sangat penting dalam mendukung implementasi sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis yang mampu bekerja secara *real-time* memiliki respon yang cepat, serta mudah dikembangkan sesuai dengan kebutuhan penelitian.

2.2.7 ESP32 WROOM 32



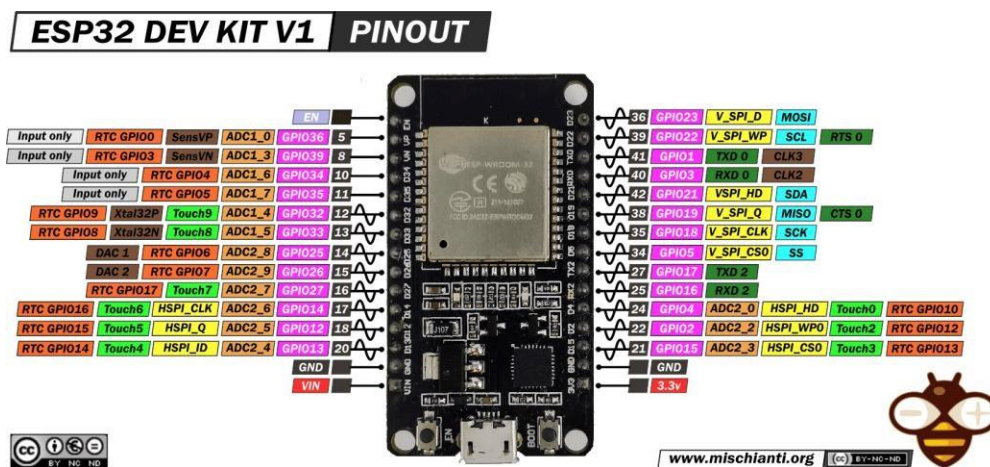
Gambar 2- 6 ESP32 WROOM 32

ESP32 merupakan salah satu papan pengembangan (*development board*) yang menggunakan mikrokontroler ESP32 buatan Espressif Systems. Perangkat ini dirancang untuk mendukung pengembangan berbagai aplikasi *embedded system*, khususnya yang membutuhkan konektivitas nirkabel melalui Wi-Fi maupun Bluetooth dalam satu modul. Dibandingkan dengan mikrokontroler generasi sebelumnya, ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan yang lebih tinggi, konsumsi daya yang lebih rendah, serta jumlah pin masukan dan keluaran (*General Purpose Input Output* atau GPIO) yang lebih banyak. Keunggulan tersebut menjadikan ESP32 banyak digunakan pada sistem otomasi, Internet of Things (IoT), akuisisi data, robotika, maupun sistem monitoring berbasis sensor.

ESP32 menggunakan prosesor *dual-core Tensilica Xtensa LX6* dengan frekuensi kerja hingga 240 MHz, sehingga mampu menjalankan beberapa proses secara bersamaan (*multitasking*) dengan performa yang baik. Selain itu, papan pengembangan ini telah dilengkapi dengan memori SRAM dan *Flash Memory* yang cukup besar untuk menyimpan program maupun data selama proses pengoperasian. ESP32 juga menyediakan berbagai antarmuka komunikasi, seperti UART, SPI, I²C, PWM, ADC, DAC, serta Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 (Classic dan BLE) yang memungkinkan perangkat berkomunikasi dengan sensor, aktuator, maupun perangkat lain secara mudah.

Ketersediaan berbagai fitur tersebut membuat ESP32 menjadi salah satu mikrokontroler yang banyak dipilih dalam pengembangan sistem monitoring dan kendali modern [2] [3] [6].

Salah satu keunggulan utama ESP32 adalah kemampuannya dalam melakukan pembacaan sinyal analog melalui modul *Analog to Digital Converter* (ADC) dengan resolusi hingga 12 bit. Fitur ini memungkinkan ESP32 menerima data dari berbagai sensor analog, seperti sensor tekanan, sensor suhu, maupun sensor arus listrik. Selain itu, ESP32 juga mendukung komunikasi digital dengan berbagai modul eksternal, seperti HX711, LCD berbasis I²C, modul relay, serta berbagai sensor digital lainnya. Dukungan terhadap jaringan Wi-Fi memungkinkan data hasil pengukuran dikirimkan secara *real-time* ke server atau platform Internet of Things (IoT), sedangkan fitur Bluetooth dapat dimanfaatkan untuk komunikasi jarak dekat dengan perangkat lain. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 tidak hanya berfungsi sebagai pengendali sistem, tetapi juga sebagai pusat pengolahan dan komunikasi data dalam satu perangkat [8].



Gambar 2 1 PinOut ESP32 WROOM 32

Tabel 2- 1 Spesifikasi ESP32 WROOM 32

No	Pin GPIO	Nama Pin	Fungsi Utama	Keterangan

1.	GPIO0	BOOT	Digital I/O	Kondisi Low Saat Upload
2.	GPIO1	TX0	UART TX	Serial Komunikasi
3.	GPIO2	IO2	Digital I/O	Kondisi Harus Low Saat Boot
4.	GPIO3	RX0	UART RX	Serial Komunikasi
5.	GPIO4	IO4	Digital I/O	Bebas Digunakan
6.	GPIO5	IO5	SPI/Digital	Output
7.	GPIO12	IO12	Digital/ADC	Boot Voltage
8.	GPIO13	IO13	Digital/ADC	Bebas
9.	GPIO14	IO14	Digital/PWM	Bebas
10.	GPIO15	IO15	Digital	Boot Configuration
11.	GPIO16	IO16	Digital	UART2 RX
12.	GPIO17	IO17	Digital	UART2 TX
13.	GPIO18	IO18	SPI CLK	Bebas
14.	GPIO19	IO19	SPI MISO	Bebas
15.	GPIO21	SDA	I2C Data	LCD I2C
16.	GPIO22	SCL	I2C Clock	LCD I2C
17.	GPIO23	IO23	SPI MOSI	Bebas
18.	GPIO25	IO25	DAC/ADC	Input Sensor
19.	GPIO26	IO26	DAC/ADC	Input Sensor
20.	GPIO27	IO27	ADC	Input Only
21.	GPIO32	IO32	ADC	Input Only
22.	GPIO33	IO33	ADC	Input Only
23.	GPIO34	IO34	ADC	Input Only
24.	GPIO35	IO35	ADC	Input Only
25.	GPIO36	VP	ADC	Input Only
26.	GPIO39	VN	ADC	Input Only
27.	EN	ENABLE	Reset	Kondisi High
28.	VIN	5V	Power Input	Supply 5v
29.	3V3	3.3V	Power Output	Output Tegangan
30.	GND	GROUND	Ground	

Pemilihan pin pada ESP32 sangat berpengaruh dalam perancangan sistem baik monitoring ataupun kendali pada sistem alat terutama pada monitoring pengisian udara otomatis pada kinerja kompresor selama berlangsung. ESP32 dapat memberikan sinyal trigger pada output hasil data yang diperoleh dan dikirimkan melalui program yang sudah di perintahkan.

2.2.8 Modul Relay



Gambar 2- 7 Modul Relay

Modul relay 1 channel umumnya memiliki terminal kendali berupa VCC, GND, dan IN. VCC digunakan sebagai sumber tegangan modul, GND sebagai ground, sedangkan IN menerima sinyal kendali dari mikrokontroler. Pada bagian kontak relay terdapat terminal COM (Common), NO (Normally Open), dan NC (Normally Closed). COM merupakan terminal bersama, NO merupakan kontak yang terbuka ketika relay tidak aktif, sedangkan NC merupakan kontak yang terhubung dengan COM ketika relay dalam kondisi tidak aktif [13].

Prinsip kerja relay didasarkan pada elektromagnet. Ketika sinyal diberikan pada bagian kendali relay, kumparan relay mendapatkan energi dan menghasilkan medan magnet yang menarik kontak mekanis. Perubahan posisi kontak tersebut menyebabkan hubungan antara COM dengan NO atau NC berubah. Dengan demikian, relay dapat digunakan untuk menghidupkan atau mematikan beban

sesuai dengan perintah yang diberikan oleh mikrokontroler. Beberapa modul relay juga dilengkapi LED indikator untuk menunjukkan kondisi relay.

Tabel 2- 2 PinOut Modul Relay

No	Pin	Fungsi Utama	Keterangan
1.	VCC	Vin	Sebagai sumber tegangan yang masuk ke relay
2.	GND	Ground	Sebagai jalur negatif yang masuk ke relay
3.	IN	Input Pin	Sebagai jalur masuk antara Pin ESP ke Relay
4.	COM	Common	Sebagai kondisi ketika relay mendapat trigger tegangan
5.	NO	Normally Open	Kondisi Relay Terbuka saat belum mendapat tegangan
6.	NC	Normally Close	Kondisi Relay OFF

2.2.9 Sensor Tekanan G1/4



Gambar 2- 8 Sensor Tekanan G1/4

Sensor tekanan merupakan perangkat yang digunakan untuk mendeteksi besarnya tekanan fluida, baik berupa gas maupun cairan, kemudian mengubah

besaran tekanan tersebut menjadi sinyal listrik yang dapat diolah oleh sistem elektronik. Sensor tekanan banyak digunakan pada berbagai bidang, seperti industri manufaktur, sistem pneumatik, hidrolik, otomotif, hingga peralatan medis karena mampu memberikan informasi kondisi tekanan secara real-time dengan tingkat akurasi yang tinggi. Pada sistem otomasi, sensor tekanan memiliki peran penting sebagai perangkat umpan balik atau *feedback* yang memungkinkan proses pengendalian berlangsung secara otomatis berdasarkan nilai tekanan yang terukur. Oleh karena itu, pemilihan sensor tekanan yang sesuai menjadi salah satu faktor yang menentukan keberhasilan suatu sistem monitoring maupun sistem kontrol otomatis [5] [7].

Secara umum, sensor tekanan G1/4 yang digunakan pada aplikasi pneumatik memiliki rentang pengukuran mulai dari 0–0,8 MPa, 0–1 MPa, hingga 0–1,2 MPa dengan keluaran berupa tegangan analog 0,5–4,5 VDC atau 0–5 VDC, tergantung tipe sensor yang digunakan. Sensor ini bekerja menggunakan catu daya 5 VDC, memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, serta mampu memberikan respon yang cepat terhadap perubahan tekanan udara di dalam sistem. Keluaran analog dari sensor kemudian dibaca oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) yang terdapat pada mikrokontroler ESP32 sehingga nilai tekanan dapat diubah menjadi data digital untuk diproses lebih lanjut. Selain rentang pengukuran, parameter lain yang perlu diperhatikan meliputi linearitas, histeresis, sensitivitas, resolusi, dan stabilitas terhadap perubahan temperatur karena parameter tersebut akan memengaruhi ketelitian hasil pengukuran.

Pada penelitian ini, sensor tekanan G1/4 dipasang pada tabung penampung udara untuk memantau tekanan hasil kompresi dari kompresor D25WZ1 secara *real-time*. Sensor akan mengubah tekanan udara di dalam tabung menjadi sinyal tegangan analog yang selanjutnya dibaca oleh ESP32 melalui pin ADC. Data hasil pembacaan tersebut kemudian dikonversi menjadi satuan tekanan, seperti psi atau bar, sesuai dengan program yang telah dirancang. Berdasarkan nilai tekanan yang diperoleh, ESP32 akan menentukan kondisi kerja kompresor. Ketika tekanan berada di bawah batas minimum yang telah ditentukan pada

mikrokontroler akan mengaktifkan modul relay sehingga kompresor kembali melakukan pengisian udara. Sebaliknya, apabila tekanan telah mencapai batas maksimum, relay akan dimatikan sehingga kompresor berhenti bekerja. Dengan mekanisme tersebut, tekanan udara di dalam tabung dapat dipertahankan pada rentang kerja yang diinginkan sehingga sistem pneumatik dapat beroperasi secara lebih stabil.

Tabel 2- 3 PinOut Sensor Tekanan G1/4

No	Warna Kabel	Fungsi	Keterangan
1	Merah	VCC	Menerima Tegangan Sebesar 5V
2	Kuning	Output	Keluaran yang mendapatkan sinyal dari ESP32
3	Hitam	GND	Ground

Pada tabel 2.5 menunjukkan warna kabel pada sensor tekanan tipe G1/4 yang memiliki 3 warna kabel dengan masing-masing fungsi. Warna merah menunjukkan bahwa sensor akan menerima tegangan supply sebesar 5V sesuai dengan datasheet pada sensor. Warna kabel kuning akan menerima sinyal trigger dari mikrokontroler yaitu ESP32 selama sensor berjalan atau menerima sinyal. Warna hitam menunjukkan kabel pada *Grounding*.

2.2.10 Power Supply 24V



Gambar 2- 9 Power Supply 24V

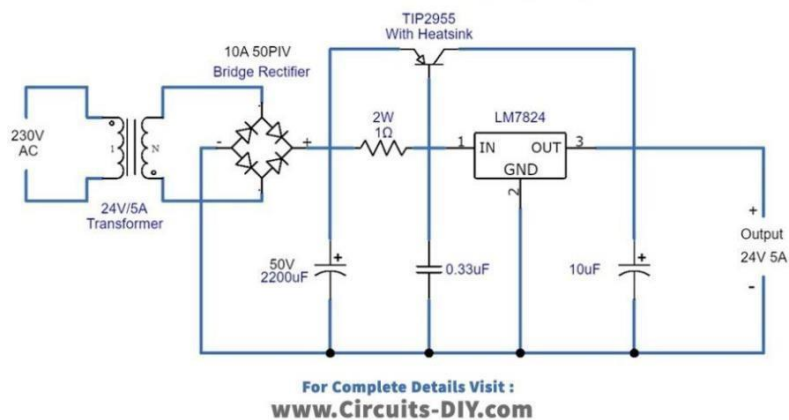
Power supply merupakan perangkat elektronika yang berfungsi sebagai sumber catu daya untuk menyuplai energi listrik kepada seluruh komponen dalam suatu sistem. Fungsi utama power supply adalah mengubah energi listrik dari sumber utama menjadi tegangan dan arus yang sesuai dengan kebutuhan perangkat elektronika. Pada sistem otomasi industri, power supply umumnya mengubah tegangan 220 VAC dari jaringan listrik menjadi tegangan DC yang stabil, seperti 5 VDC, 12 VDC, atau 24 VDC. Tegangan keluaran yang stabil sangat penting karena dapat menjaga kinerja perangkat elektronik tetap optimal serta mengurangi risiko kerusakan akibat fluktuasi tegangan. Oleh karena itu, power supply menjadi salah satu komponen utama dalam sistem kendali dan monitoring berbasis mikrokontroler [12].

Prinsip kerja power supply diawali dengan proses penyearahan yang mengubah tegangan bolak-balik *Alternating Current* atau AC menjadi tegangan searah *Direct Current* atau DC. Selanjutnya, tegangan DC tersebut akan melalui proses penyaringan *filtering* untuk mengurangi riak *ripple voltage* sehingga menghasilkan keluaran yang lebih halus. Pada power supply tipe *Switching Mode Power Supply* tegangan kemudian diatur menggunakan rangkaian switching berfrekuensi tinggi sehingga diperoleh efisiensi yang lebih baik

dibandingkan power supply linier. Selain memiliki ukuran yang lebih ringkas, SMPS juga menghasilkan panas yang lebih rendah serta mampu mempertahankan kestabilan tegangan keluaran meskipun terjadi perubahan beban pada sistem [14].

Pada penelitian ini, power supply 24 VDC digunakan sebagai sumber utama untuk menyuplai energi listrik pada komponen-komponen yang membutuhkan tegangan kerja 24 V, seperti solenoid valve dan perangkat pendukung lainnya. Selain itu, tegangan 24 VDC juga menjadi sumber masukan bagi modul DC-DC Buck Converter yang menurunkan tegangan menjadi 5 VDC sesuai kebutuhan ESP32, modul HX711 dan LCD 20×4 serta sensor tekanan. Dengan konfigurasi tersebut, setiap komponen memperoleh tegangan kerja yang sesuai dengan spesifikasinya sehingga dapat beroperasi secara optimal. Stabilitas tegangan yang dihasilkan power supply juga berpengaruh terhadap akurasi pembacaan sensor dan keandalan sistem monitoring secara keseluruhan.

24V 5A Power Supply Circuit



Gambar 2- 10 Rangkaian Power Supply 24V

Tabel 2- 4 Spesifikasi Rangkaian Power Supply 24V

No	Komponen	Spesifikasi	Keterangan
----	----------	-------------	------------

1	Transformator Step-Down	Input 230 VAC	Menurunkan tegangan AC dari jaringan listrik menjadi 24 VAC.
2	Bridge Rectifier	10A	Mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC penuh (<i>full-wave rectifier</i>).
3	Kapasitor Filter	2200 μ F / 50 V	Mengurangi riak (<i>ripple</i>) pada tegangan DC hasil penyearahan.
4	Resistor	1 Ω , 2 W	Membatasi arus dan membantu kestabilan kerja regulator.
5	Transistor TIP2955	PNP Power Transistor	Meningkatkan kemampuan arus keluaran regulator LM7824.
6	Regulator Tegangan	LM7824	Menstabilkan tegangan keluaran menjadi 24 VDC.
7	Kapasitor Input	0,33 μ F	Menyaring gangguan (<i>noise</i>) pada sisi input regulator
8	Kapasitor Output	10 μ F	Menjaga kestabilan tegangan keluaran regulator.
9	Output Power Supply	24 VDC, 5 A	Menyuplai tegangan DC ke sistem elektronik.

Berdasarkan tabel 2.7 rangkaian power supply terdiri atas beberapa komponen yang saling terintegrasi untuk menghasilkan tegangan keluaran 24 VDC yang stabil. Proses diawali dari transformator step-down yang menurunkan tegangan listrik PLN sebesar 230 VAC menjadi 24 VAC. tegangan AC tersebut kemudian masuk ke *bridge rectifier* untuk diubah menjadi tegangan DC melalui proses penyearahan gelombang penuh (*full-wave rectification*). Agar tegangan DC yang dihasilkan menjadi lebih halus, dipasang kapasitor elektrolit 2200 μF sebagai filter yang berfungsi mengurangi riak (*ripple voltage*). tegangan DC difilter kembali sebelum masuk ke IC regulator LM7824 yang berfungsi menjaga agar tegangan keluaran tetap berada pada 24 VDC meskipun terjadi perubahan tegangan masukan atau variasi beban. Untuk meningkatkan kemampuan arus keluaran hingga mencapai 5 A, digunakan transistor daya TIP2955 sebagai penguat arus. Selain itu, resistor 1 Ω berfungsi membantu pembatasan arus sekaligus mengatur distribusi arus antara regulator dan transistor daya sehingga sistem bekerja lebih stabil. Pada sisi regulator juga dipasang kapasitor 0,33 μF pada bagian masukan dan kapasitor 10 μF pada bagian keluaran. Kedua kapasitor tersebut berfungsi meredam gangguan frekuensi tinggi (*noise*) serta menjaga kestabilan tegangan regulator selama proses pensaklaran maupun ketika terjadi perubahan beban. Kombinasi seluruh komponen tersebut menghasilkan keluaran 24 VDC dengan kemampuan arus hingga 5 A

2.2.11 Modul LM 2596



Gambar 2- 11 Modul LM2596

Modul LM2596 merupakan modul DC-DC Buck Converter (*step-down converter*) yang berfungsi menurunkan tegangan DC menjadi tegangan DC yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Modul ini menggunakan IC regulator switching LM2596 sehingga mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dengan kehilangan daya yang lebih kecil dibandingkan regulator linear. Karena memiliki efisiensi yang tinggi, modul LM2596 banyak digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler untuk menyediakan tegangan kerja yang sesuai bagi berbagai komponen elektronika [14]

Prinsip kerja modul LM2596 didasarkan pada teknik *switching regulator*. Tegangan masukan DC akan dikendalikan oleh IC LM2596 melalui proses pensaklaran berfrekuensi tinggi, kemudian dilewatkan ke induktor dan kapasitor filter sehingga menghasilkan tegangan keluaran DC yang lebih rendah dan stabil. Besarnya tegangan keluaran dapat diatur menggunakan trimpot (*potensiometer multiturn*) yang tersedia pada modul. Dengan metode ini, efisiensi konversi daya dapat mencapai lebih dari 80%, sehingga panas yang dihasilkan relatif kecil dibandingkan regulator linear [13]

Modul LM2596 umumnya mampu menerima tegangan masukan antara 4 VDC hingga 40 VDC dengan tegangan keluaran yang dapat diatur mulai 1,25 VDC hingga 37 VDC. Modul ini memiliki kemampuan arus keluaran maksimum hingga 3 A dengan efisiensi konversi mencapai sekitar 92%, tergantung pada kondisi beban dan tegangan kerja. Selain itu, modul LM2596 juga dilengkapi dengan sistem proteksi terhadap suhu berlebih dan pembatas arus sehingga lebih aman digunakan pada sistem elektronika.

Tabel 2- 5 PinOut Modul LM2596

No	Nama Pin	Keterangan
1	IN+	Masukan Tegangan Positif 24V to 5V
2	IN-	Masukan Tegangan Negatif
3	OUT+	Keluaran Tegangan 5V

4	OUT-	Grounding
---	------	-----------

Berdasarkan tabel 2-8 modul LM2596 berfungsi sebagai penghubung antara power supply 24 VDC dengan komponen-komponen yang memerlukan tegangan kerja 5 VDC. Terminal IN+ dan IN- menerima suplai dari power supply, kemudian tegangan tersebut dikonversi menjadi 5 VDC pada terminal OUT+ dan OUT-. Tegangan keluaran selanjutnya didistribusikan ke ESP32, modul relay, HX711, LCD, serta sensor yang digunakan pada penelitian. Dengan konfigurasi tersebut, seluruh komponen memperoleh catu daya yang stabil sehingga dapat bekerja secara optimal.

2.2.12 LCD 20x4 dan I2C



Gambar 2- 12 LCD 20X4

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat keluaran yang berfungsi untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter, angka, maupun simbol sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi suatu sistem secara langsung. LCD bekerja dengan memanfaatkan sifat kristal cair (*liquid crystal*) yang dapat mengubah orientasi molekul ketika diberikan medan listrik, sehingga mampu mengatur cahaya yang melewati lapisan polarisasi dan menghasilkan tampilan karakter pada layar. Dibandingkan dengan indikator LED konvensional, LCD memiliki konsumsi daya yang lebih rendah, mampu menampilkan informasi yang lebih banyak, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai jenis

mikrokontroler. Oleh karena itu, LCD banyak digunakan pada sistem monitoring, instrumen pengukuran, maupun perangkat otomasi industri sebagai media penyampaian informasi kepada operator.

Prinsip kerja LCD diawali dengan pengiriman data karakter dari mikrokontroler menuju pengendali LCD. Data tersebut kemudian diterjemahkan menjadi pola piksel yang akan ditampilkan pada layar. Pada penggunaan modul I²C, komunikasi dilakukan melalui dua jalur, yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL), sehingga proses pertukaran data menjadi lebih sederhana dibandingkan antarmuka paralel. Selain mengurangi jumlah pin yang digunakan, komunikasi I²C juga mempermudah proses pemasangan rangkaian serta meningkatkan efisiensi penggunaan pin GPIO pada mikrokontroler. Dengan metode komunikasi ini, LCD dapat memperbarui informasi secara cepat sehingga pengguna dapat memantau perubahan kondisi sistem secara *real-time*.

LCD 20×4 digunakan sebagai media untuk menampilkan informasi hasil pembacaan sensor serta kondisi kerja sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis. Informasi yang ditampilkan meliputi nilai tekanan udara yang dibaca oleh sensor tekanan G1/4, nilai gaya tekan yang diperoleh dari sensor load cell melalui modul HX711, serta status kerja kompresor dan proses penekanan pada mesin stempel pneumatik. Dengan tampilan empat baris, beberapa parameter dapat ditampilkan secara bersamaan sehingga operator tidak perlu berpindah menu untuk mengetahui kondisi sistem. Penyajian informasi secara langsung pada LCD juga memudahkan proses pemantauan selama alat beroperasi.



Gambar 2- 13 PinOut I2C LCD 20X4

Tabel 2- 6 PinOut I2C LCD 20X4

No	Nama Pin	Fungsi	Keterangan
1	GND	Ground	Terhubung ke ground sistem mikrokontroler
2	VIN	Catu Daya	Tegangan suplai LCD, umumnya +5 V
3	SDA	Serial Data	Jalur data komunikasi I ² C antara mikrokontroler dan LCD
4	SCL	SerialClock	Jalur clock komunikasi I ² C antara mikrokontroler dan LCD

Berdasarkan dari tabel 2-9 LCD 20x4 dan I2C digunakan sebagai media perantara pada penampilan hasil data pada alat dengan program yang sudah diperintahkan. Oleh karena itu, penggunaan LCD I2C menjadi bagian penting dalam perancangan media interface pada sistem ini.

2.2.13 Push Button



Gambar 2- 14 Push Button

Push button momentary adalah jenis sakelar tekan yang hanya mempertahankan kondisi kontak selama tombol ditekan. Ketika tombol dilepas, kontak akan kembali ke kondisi awal secara otomatis. Jenis push button ini berbeda dengan sakelar *maintained*, yang akan tetap berada pada kondisi ON atau OFF setelah ditekan.

Pada push button momentary umumnya terdapat dua kondisi kontak, yaitu Normally Open (NO) dan Normally Closed (NC). Pada konfigurasi NO, kondisi kontak dalam keadaan terbuka ketika tombol tidak ditekan dan akan menjadi tertutup ketika tombol ditekan. Sebaliknya, pada konfigurasi NC, kontak dalam keadaan tertutup ketika tombol tidak ditekan dan akan terbuka ketika tombol ditekan.

Dalam sistem mesin stempel pneumatik, push button momentary dapat digunakan sebagai input perintah untuk memulai proses kerja. Ketika tombol ditekan, sinyal diberikan kepada rangkaian kontrol atau mikrokontroler sehingga sistem menjalankan proses yang telah diprogram. Setelah tombol dilepas, kondisi tombol kembali ke keadaan semula. Penggunaan jenis tombol ini sesuai untuk memberikan perintah sesaat, misalnya perintah *start* atau pemicu awal satu siklus proses.

2.2.14 Arduino IDE



Gambar 2- 15 Aplikasi Arduino IDE

Arduino Integrated Development Environment (Arduino IDE) merupakan perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk menulis, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke berbagai jenis papan mikrokontroler, termasuk Arduino dan ESP32. Arduino IDE dikembangkan dengan tujuan memberikan lingkungan pemrograman yang sederhana sehingga mudah digunakan oleh pemula maupun pengembang sistem *embedded*. Perangkat lunak ini mendukung bahasa pemrograman berbasis C/C++ serta menyediakan berbagai pustaka (*library*) yang memudahkan proses integrasi dengan sensor, aktuator, modul komunikasi, maupun perangkat elektronik lainnya. Karena kemudahan penggunaannya, Arduino IDE menjadi salah satu platform pengembangan yang paling banyak digunakan dalam penelitian, pendidikan, dan pengembangan prototipe sistem otomasi maupun Internet of Things (IoT).

Secara umum Arduino IDE terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu Editor, Compiler, dan Uploader. Editor digunakan untuk menulis serta memodifikasi program yang disebut *sketch*. Setelah program selesai dibuat, compiler akan menerjemahkan kode sumber menjadi bahasa mesin (*machine code*) yang dapat dipahami oleh mikrokontroler. Selanjutnya, hasil kompilasi akan dikirimkan ke papan mikrokontroler melalui proses *upload* menggunakan komunikasi serial. Arduino IDE juga menyediakan fitur Serial Monitor yang memungkinkan

pengguna menampilkan data hasil pembacaan sensor atau proses debugging secara langsung. Fitur ini sangat membantu dalam proses pengujian sistem karena kesalahan program dapat dideteksi dan diperbaiki dengan lebih mudah.

Pada penelitian ini, Arduino IDE digunakan sebagai perangkat lunak utama untuk mengembangkan program yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32. Seluruh algoritma sistem, mulai dari pembacaan data sensor tekanan G1/4, pengolahan data load cell melalui modul HX711, pengendalian modul relay, hingga penampilan informasi pada LCD 20×4, ditulis menggunakan Arduino IDE. Selain itu, perangkat lunak ini juga digunakan untuk melakukan proses pengujian, kalibrasi sensor, serta verifikasi fungsi setiap komponen sebelum sistem diimplementasikan secara keseluruhan. Dengan memanfaatkan fitur Serial Monitor, hasil pembacaan sensor dapat diamati secara langsung sehingga proses pengembangan dan evaluasi sistem menjadi lebih mudah dilakukan.

Pemilihan Arduino IDE pada penelitian ini didasarkan pada kemudahan penggunaan, kompatibilitas yang baik dengan ESP32, serta dukungan komunitas yang sangat luas. Perangkat lunak ini menyediakan berbagai pustaka yang terus diperbarui sehingga memudahkan pengembangan sistem monitoring berbasis mikrokontroler. Selain itu, proses kompilasi dan pengunggahan program dapat dilakukan dengan cepat sehingga mempercepat proses pengujian maupun penyempurnaan sistem. Dengan demikian, Arduino IDE menjadi perangkat lunak yang mendukung seluruh tahapan pengembangan sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis, mulai dari proses pemrograman hingga pengujian alat secara menyeluruh.

2.2.15 Parameter Kinerja Sensor Tekanan

Pada penelitian rancang bangun sistem monitoring tekanan pengisian udara otomatis, diperlukan suatu metode untuk mengevaluasi apakah sistem yang dikembangkan telah bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Evaluasi tersebut dilakukan melalui proses pengujian terhadap hasil pembacaan sensor tekanan G1/4 yang kemudian dibandingkan dengan alat ukur referensi berupa

pressure gauge. Perbandingan kedua hasil pengukuran tersebut bertujuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian data yang dihasilkan oleh sistem monitoring dengan kondisi tekanan sebenarnya pada sistem pneumatik.

Pengujian sistem dilakukan pada beberapa variasi tekanan kerja yang diperoleh selama proses pengisian udara oleh kompresor. Pada setiap variasi tekanan, sensor G1/4 akan melakukan pembacaan secara berulang untuk memperoleh sejumlah data pengukuran. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan beberapa parameter statistik sehingga dapat diketahui karakteristik performa sistem monitoring. Pengambilan data secara berulang bertujuan untuk mengurangi pengaruh kesalahan acak (*random error*) yang dapat muncul akibat fluktuasi tekanan udara, gangguan sinyal listrik, maupun toleransi karakteristik sensor.

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi nilai rata-rata atau *mean*, standar deviasi, persentase *error* dan akurasi pengukuran. Keempat parameter tersebut dipilih karena mampu memberikan informasi yang saling melengkapi mengenai kualitas hasil pengukuran. Nilai rata-rata digunakan untuk memperoleh nilai representatif dari hasil pembacaan sensor pada setiap variasi tekanan. Standar deviasi digunakan untuk mengetahui tingkat kestabilan atau presisi hasil pembacaan sensor selama pengujian berlangsung. Persentase *error* digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi, sedangkan nilai akurasi digunakan untuk menunjukkan tingkat ketepatan sistem monitoring dalam mengukur tekanan udara.

Seluruh hasil perhitungan parameter pengujian akan dibahas lebih lanjut pada BAB V berdasarkan data eksperimen yang diperoleh selama proses pengujian alat. Dengan demikian, analisis parameter kinerja tidak hanya digunakan untuk menilai performa sensor tekanan, tetapi juga untuk mengevaluasi keberhasilan sistem monitoring secara keseluruhan dalam menghasilkan data tekanan yang akurat, stabil, dan dapat dipercaya sebagai dasar pengendalian sistem pneumatik.

a. Nilai Rata-rata (Mean)

Nilai rata-rata (*mean*) merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk menunjukkan kecenderungan pusat (*central tendency*) dari sekumpulan data hasil pengukuran. Dalam proses pengujian sensor, pengambilan data umumnya dilakukan secara berulang pada kondisi tekanan yang sama untuk mengurangi pengaruh kesalahan acak (*random error*). Oleh karena itu, nilai rata-rata digunakan sebagai nilai representatif yang menggambarkan hasil pengukuran sensor secara keseluruhan.

Pada penelitian ini, setiap variasi tekanan akan diukur beberapa kali menggunakan sensor tekanan G1/4 dan *pressure gauge* sebagai alat ukur referensi. Seluruh hasil pengukuran tersebut kemudian dijumlahkan dan dibagi dengan jumlah data sehingga diperoleh satu nilai rata-rata yang mewakili hasil pembacaan sensor pada kondisi pengujian tertentu. Nilai rata-rata inilah yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan standar deviasi, persentase *error*, dan akurasi. Persamaan untuk menghitung nilai rata-rata ditunjukkan pada Persamaan (2.1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Persamaan 2-1}$$

Keterangan:

$\bar{x}$: Nilai rata-rata hasil pengukuran

x_i : Data hasil pengukuran ke- i

n : Jumlah data pengukuran

Semakin banyak jumlah data yang digunakan dalam perhitungan, maka nilai rata-rata yang diperoleh akan semakin mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya dari hasil pengukuran sensor.

b. Standar Deviasi

Standar deviasi merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran data hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Parameter ini sangat penting dalam evaluasi sensor karena menunjukkan tingkat konsistensi hasil pembacaan ketika pengukuran dilakukan secara berulang pada kondisi yang sama. Sensor dengan nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pengukurannya relatif stabil dan memiliki tingkat presisi yang baik.

Dalam penelitian ini, nilai standar deviasi dihitung dari seluruh data hasil pembacaan sensor tekanan pada setiap variasi tekanan pengujian. Apabila hasil pengukuran memiliki penyimpangan yang kecil terhadap nilai rata-ratanya, maka sensor dapat dikatakan memiliki performa yang konsisten. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang besar menunjukkan bahwa pembacaan sensor masih mengalami fluktuasi sehingga tingkat presisinya menjadi lebih rendah. Perhitungan standar deviasi menggunakan Persamaan (2.2).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Persamaan 2-2}$$

Keterangan:

SD : Standar Deviasi

x_i : Data hasil pengukuran

$\bar{x}$: Nilai rata-rata

n : Jumlah data pengukuran

Berdasarkan dari rumus di atas maka semakin kecil nilai standar deviasi yang diperoleh maka semakin baik tingkat presisi sensor tekanan dalam melakukan pengukuran.

c. *Persentase Error*

Persentase *error* merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan hasil pembacaan sensor tekanan terhadap alat ukur referensi. Dalam penelitian ini, alat ukur referensi yang digunakan adalah *pressure gauge* yang dipasang pada sistem pneumatik. Nilai *error* dihitung dengan membandingkan hasil pembacaan sensor tekanan G1/4 terhadap nilai tekanan yang ditunjukkan oleh *pressure gauge* pada setiap variasi tekanan pengujian.

Perhitungan persentase *error* bertujuan untuk mengetahui tingkat ketelitian sistem monitoring tekanan yang dikembangkan. Nilai *error* yang kecil menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor memiliki kesesuaian yang tinggi terhadap alat ukur referensi. Sebaliknya, apabila nilai *error* besar, maka sistem monitoring masih memiliki penyimpangan yang perlu diperbaiki melalui proses kalibrasi atau penyempurnaan perangkat. *Persentase error* dihitung menggunakan Persamaan (2.3).

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{P_r - P_s}{P_r} \right| \times 100\% \quad \text{Persamaan 2-3}$$

Keterangan:

P_r : tekanan hasil pembacaan *pressure gauge*

P_s : tekanan hasil pembacaan sensor

Berdasarkan dari rumus di atas nilai *error* yang mendekati nol menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor memiliki penyimpangan yang sangat kecil terhadap alat ukur referensi.