

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Setelah meninjau berbagai sumber pustaka, baik dari jurnal ilmiah maupun hasil penelitian sebelumnya, diperoleh sejumlah penelitian yang relevan dan telah dilakukan terkait sistem pencampuran cairan dan otomatisasi proses industri. Ringkasan penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi acuan dan pembanding dalam tugas akhir ini disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka

NO	Peneliti & Judul	Keterangan	Perbaikan / Keterbatasan
1	Try Andio Rahmandika & Fivia Eliza (2022) <i>“Perancangan Sistem Pencampuran Cat Berbasis Mikrokontroler — JTEIN”</i>	Penelitian ini merancang sistem pencampuran cat otomatis berbasis mikrokontroler arduino Uno (ATmega328) untuk menggabungkan warna dasar CMYK menjadi berbagai variasi warna. Keluaran cat diatur menggunakan motor servo yang berfungsi sebagai katup, sedangkan motor DC digunakan sebagai pengaduk untuk menghasilkan campuran yang homogen. Sistem dikendalikan melalui antarmuka Visual Basic pada computer yang dapat dilakukan dengan memilih warna dan menentukan	Pengaturan volume cat masih menggunakan metode berbasis waktu (delay buka dan tutup katup), sehingga akurasi takaran dapat dipengaruhi oleh variasi debit aliran dan karakteristik fluida. Sistem juga belum menggunakan umpan balik massa atau sensor berat untuk menjamin ketepatan komposisi campuran dan pengendalian aliran belum menerapkan kontrol kecepatan pompa atau mekanisme dosing presisi yang cukup baik terhadap

		komposisi campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan warna yang mendekati nilai <i>set point</i> serta mengeluarkan volume cat sesuai pengaturan program dengan metode pengaturan waktu bukaan katup [8].	perubahan kondisi operasional.
2	Haji Wijaya & Sulaiman (2025) <i>“Rancang Bangun Alat Pencampuran Cat Air 3 Warna Dasar Berbasis Mikrokontroler”</i>	Penelitian ini merancang alat pencampuran cat air otomatis berbasis mikrokontroler dengan integrasi arduino Nano sebagai pengendali utama dan NodeMCU ESP8266 untuk konektivitas dan pengendalian melalui aplikasi Android. Sistem menggunakan sensor warna TCS3200 untuk mendeteksi hasil warna campuran serta sensor ultrasonik untuk mendeteksi ketersediaan cairan. Motor servo berfungsi sebagai katup pengatur aliran cat, sedangkan motor DC	Pengaturan komposisi campuran masih berdasarkan persentase yang telah diprogram dan tidak menggunakan sistem pengukuran massa atau umpan balik berat untuk menjamin ketepatan takaran bahan. Kontrol aliran cairan juga belum menerapkan pengaturan debit yang tergantung terhadap perubahan kondisi fluida. Selain itu, meskipun sensor warna digunakan untuk mendeteksi hasil campuran, sistem belum mengimplementasikan mekanisme koreksi

		digunakan sebagai pengaduk untuk menghasilkan campuran yang homogen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu mencampurkan tiga warna dasar (merah, kuning, biru) menjadi berbagai warna sekunder dan tersier dengan volume campuran yang konsisten [4].	otomatis untuk menyesuaikan komposisi warna ketika terjadi deviasi dari warna target.
3	Dr. S. S. Khedkar et al. (2020) “Study of Liquid Dispensing and Mixing in Fluid Handling Systems – A Review Article”	Jurnal ini mengkaji berbagai metode dispensing, metering, dan mixing fluida dalam sistem penanganan cairan otomatis untuk meningkatkan akurasi, efisiensi waktu, dan mengurangi pengaruh manusia. Otomasi berbasis mikrokontroler dan arduino banyak digunakan untuk mengontrol pompa, katup, sensor, dan pengaduk sehingga proses pengeluaran dan pencampuran cairan dapat dilakukan secara presisi dan konsisten. Studi ini juga menyoroti	Jurnal ini bersifat tinjauan literatur sehingga tidak menyajikan implementasi sistem prototipe yang diuji secara langsung. Selain itu, sistem yang dikaji umumnya masih memisahkan fungsi metering dan mixing, serta belum menekankan penggunaan umpan balik massa untuk meningkatkan akurasi takaran.

		penggunaan solenoid valve sebagai komponen utama pengontrol aliran serta pompa peristaltik sebagai solusi efektif untuk memompa cairan dengan berbagai viskositas [9].	
4	Hari Bangun & Agus Ulinuha (2025) “Rancang Bangun Alat Pencampur Desinfektan Otomatis”	Penelitian merancang sistem pencampuran cairan otomatis menggunakan mikrokontroler arduino Nano, sensor <i>flow</i> meter untuk mengukur debit dan volume cairan, solenoid valve sebagai pengatur aliran, serta motor DC sebagai pengaduk. Sistem mampu mencampur larutan hingga kapasitas 5 liter dengan komposisi yang telah ditentukan dan menampilkan hasil pengukuran pada LCD [10].	Pengukuran berbasis <i>flow</i> meter masih menghasilkan error 0,21–1,8% dan selisih volume hingga 100–170 mL. Akurasi dipengaruhi ketidakstabilan aliran dan sisa cairan dalam pipa setelah katup tertutup. Sistem belum menggunakan umpan balik massa (<i>gravimetric</i>), kontrol debit adaptif, maupun mekanisme koreksi otomatis untuk meningkatkan presisi komposisi
5	Santamaría Alvarez, F.N. et al. (2024) <i>Influence of Refilling on Dosing</i>	Penelitian ini membahas sistem dosing <i>gravimetric</i> (loss-in-weight feeder) yang digunakan pada proses manufaktur kontinu untuk memastikan akurasi laju	Penelitian ini membahas sistem dosing <i>gravimetric</i> (loss-in-weight feeder) yang digunakan pada proses manufaktur kontinu untuk memastikan akurasi

	<i>Accuracy of Loss-in-Weight Powder Feeders in Continuous Manufacturing</i>	aliran material. Sistem bekerja dengan mengukur perubahan massa terhadap waktu menggunakan <i>load cell</i> sehingga laju aliran material dapat dikontrol secara <i>realtime</i> melalui mekanisme umpan balik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode <i>gravimetric</i> memberikan akurasi lebih tinggi dibanding mode volumetrik karena tidak dipengaruhi perubahan densitas material. Selain itu, waktu pengisian ulang (<i>refilling</i>), jenis mekanisme pengisian, dan level material dalam hopper berpengaruh signifikan terhadap deviasi laju dosis[11].	laju aliran material. Sistem bekerja dengan mengukur perubahan massa terhadap waktu menggunakan <i>load cell</i> sehingga laju aliran material dapat dikontrol secara <i>realtime</i> melalui mekanisme umpan balik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode <i>gravimetric</i> memberikan akurasi lebih tinggi dibanding mode volumetrik karena tidak dipengaruhi perubahan densitas material. Selain itu, waktu pengisian ulang (<i>refilling</i>), jenis mekanisme pengisian, dan level material dalam hopper berpengaruh signifikan terhadap deviasi laju dosis.
--	--	--	---

2.2. Sistem Pencampuran Cairan

Sistem pencampuran cairan merupakan proses penggabungan dua atau lebih komponen fluida untuk menghasilkan campuran yang homogen dengan komposisi yang sudah sesuai dengan standar. Dalam konteks industri dan produksi skala kecil, proses pencampuran yang dilakukan secara manual sering menghasilkan hasil yang kurang presisi akibat ketidakakuratan penakaran dan variasi teknik pencampuran.

Maka, penerapan sistem pencampuran otomatis menjadi solusi untuk meningkatkan konsistensi hasil, efisiensi proses, serta kualitas produk akhir.

Perkembangan teknologi otomasi dapat menjadi solusi untuk proses pencampuran cairan dilakukan secara terkontrol menggunakan sensor, aktuator, dan mikrokontroler. Sistem pencampuran otomatis bekerja dengan mengatur aliran cairan, mengukur jumlah fluida yang masuk ke wadah pencampuran, serta mengendalikan proses pencampuran berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Penggunaan sensor aliran atau metode pengukuran lainnya. Volume cairan dapat dikonversi ke satuan tertentu sehingga sistem akan mencapai komposisi campuran yang diinginkan secara lebih akurat dan dapat berulang [12].

2.3. Metode Pengendalian yang Digunakan

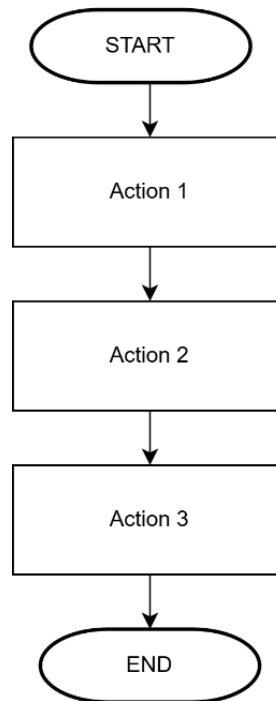
2.3.1. *Sequential Control*

Sequential Control merupakan metode pengendalian yang mengatur operasi sistem berdasarkan urutan langkah yang telah ditentukan. Dalam sistem otomatis, setiap proses dijalankan secara bertahap sesuai kondisi atau sinyal tertentu sehingga tahapan berikutnya hanya akan berlangsung setelah tahap sebelumnya selesai. Pendekatan ini banyak digunakan pada sistem otomasi berbasis mikrokontroler karena mampu mengoordinasikan kerja beberapa komponen secara sistematis dan terstruktur.

Pada sistem otomatis berbasis arduino, pengendalian berurutan memungkinkan perangkat menjalankan operasi secara logis sesuai alur proses yang telah diprogram. Sebagai contoh, pada sistem pengisian air otomatis, pompa diaktifkan setelah wadah terdeteksi siap dan berhenti ketika volume yang diinginkan tercapai [13].

Sequential Control bekerja dengan memanfaatkan logika kondisi (conditional logic) dan status proses. Setiap tahap memiliki kondisi pemicu (trigger condition) seperti sinyal sensor, waktu, atau status sistem. Ketika kondisi terpenuhi, sistem berpindah ke tahap berikutnya. Pendekatan ini meningkatkan keandalan operasi karena mencegah terjadinya konflik proses dan memastikan setiap langkah berjalan sesuai urutan yang benar. Dalam sistem kontrol modern, strategi pengendalian dipilih berdasarkan kebutuhan operasi dan karakteristik sistem agar performa dan efisiensi tetap optimal. Pengendalian berurutan menjadi salah satu pendekatan yang efektif karena sederhana,

mudah diimplementasikan, serta sesuai untuk sistem dengan tahapan proses yang jelas [14]. Prinsip kerja metode ini secara umum digambarkan melalui diagram alir pada Gambar 2.1 berikut.



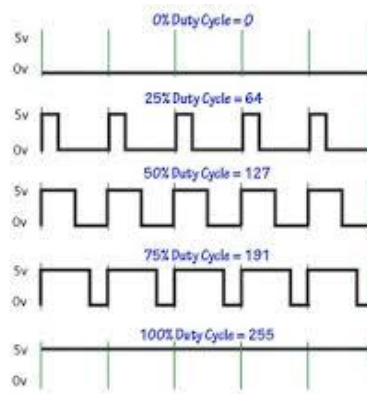
Gambar 2. 1. *Flowchart cara kerja Sequential Control*
(Dokumentasi Penulis)

Berdasarkan Gambar 2.1, metode Sequential Control bekerja secara berurutan sesuai urutan proses yang telah ditentukan. Pada sistem pencampuran cat otomatis, *Sequential Control* diterapkan untuk mengatur pengeluaran warna secara berurutan sesuai resep pencampuran. Setiap pompa diaktifkan satu per satu hingga berat target tercapai sebelum sistem beralih ke warna berikutnya. Setelah seluruh warna selesai ditambahkan, sistem melanjutkan ke tahap mixing. Pendekatan ini memastikan tidak terjadi pengeluaran bahan secara bersamaan, menjaga akurasi komposisi, serta meningkatkan konsistensi hasil pencampuran.

2.3.2. PWM (*Pulse Width Modulation*)

2.3.2.1. Gambaran umum

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode pengendalian daya yang dilakukan dengan memvariasikan lebar pulsa sinyal digital dalam satu periode tetap. Teknik ini mengatur perbandingan waktu sinyal berada pada kondisi aktif (*HIGH*) dan tidak aktif (*LOW*), yang dikenal sebagai *duty cycle*. Perbedaan duty cycle menghasilkan perubahan tegangan rata-rata yang diterima beban sehingga daya dapat dikontrol tanpa mengubah sumber tegangan [15]. Bentuk sinyal yang dihasilkan oleh metode PWM ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Bentuk gelombang PWM [16]

Berdasarkan Gambar 2.2, perubahan duty cycle menentukan besar tegangan rata-rata yang diterima beban, PWM banyak digunakan pada sistem kendali berbasis mikrokontroler karena mendapatkan keluaran analog dari sinyal digital. Dengan mengubah duty cycle, mikrokontroler dapat mengatur kecepatan motor DC, mengontrol aktuator, serta mengatur daya listrik secara efisien. Dibandingkan metode pengaturan tegangan linier, PWM memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi karena transistor saklar bekerja pada kondisi penuh hidup atau mati, sehingga rugi daya menjadi minimal

Secara prinsip, duty cycle dinyatakan dalam persentase yang menunjukkan lamanya sinyal berada pada kondisi aktif dalam satu periode. Duty cycle 0% berarti tidak ada energi yang diberikan, sedangkan 100% berarti beban menerima daya maksimum. Tegangan rata-rata keluaran berbanding lurus dengan duty cycle terhadap

tegangan sumber, sehingga perubahan duty cycle secara langsung memengaruhi energi yang diterima beban [17]

Selain efisiensi energi, PWM juga memberikan respons pengendalian yang cepat dan stabil, sehingga banyak diterapkan pada sistem penggerak motor dan pengaturan kecepatan aktuator. Pengaturan lebar pulsa memungkinkan sistem mencapai kontrol yang halus dan presisi terhadap perubahan beban dan kondisi operasi.

Secara matematis, duty cycle PWM dinyatakan sebagai:

$$D = \frac{t_{on}}{T_{tot}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

- t_{ON} = durasi sinyal aktif
- T = periode sinyal

Tegangan rata-rata keluaran yang diterima Beban :

$$V_{avg} = D \times V_{in} \quad (2.2)$$

Pada mikrokontroler arduino dengan resolusi PWM 8-bit, nilai PWM direpresentasikan dari 0–255:

$$PWM_{value} = \frac{D}{100} \times 255 \quad (2.3)$$

Secara teori, tegangan rata-rata sinyal PWM dapat dihitung berdasarkan perkalian antara duty cycle dan tegangan sumber. Namun, hasil pengukuran menggunakan multimeter tidak selalu sama dengan nilai teori tersebut. Hal ini disebabkan karena sinyal PWM bukan tegangan DC murni, melainkan sinyal pulsa ON–OFF. Keysight menjelaskan bahwa bentuk gelombang input dapat memengaruhi akurasi pembacaan multimeter, terutama pada gelombang pulsa atau non-sinusoidal [18].

2.3.2.2. Persentase Rentang Relatif Keluaran Pompa

Persentase rentang relatif atau *relative range* merupakan salah satu parameter statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran hasil pengukuran berulang terhadap nilai rata-ratanya. Parameter ini dihitung dari selisih antara nilai maksimum dan nilai minimum, kemudian dibandingkan dengan nilai rata-rata seluruh hasil pengukuran. Hafner dkk. menggunakan *relative range* untuk mengevaluasi

reproduktibilitas hasil pengukuran dengan menyatakan selisih nilai maksimum dan minimum sebagai persentase terhadap nilai rata-rata. Pendekatan serupa juga digunakan oleh Jeon dkk. untuk mengevaluasi kestabilan suatu hasil pengujian, dengan nilai rentang relatif yang lebih kecil menunjukkan hasil yang lebih konsisten.

$$RR = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2.4)$$

adalah persentase rentang relatif (%), $X_{\max}$ adalah nilai pengukuran maksimum, $X_{\min}$ adalah nilai pengukuran minimum, dan $\bar{X}$ adalah nilai rata-rata hasil pengukuran. Pada penelitian ini, parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi konsistensi massa cat yang dikeluarkan pompa dari tiga kali pengujian pada PWM 120 dan PWM 255. Semakin kecil nilai persentase rentang relatif, semakin kecil penyebaran hasil pengukuran dan semakin konsisten keluaran pompa.

2.3.3. *Gravimetric Dosing*

Weight-based control atau *gravimetric* control merupakan metode pengendalian jumlah material yang didasarkan pada pengukuran massa aktual sebagai parameter utama pengendalian. Pendekatan ini digunakan secara luas dalam proses industri dan analisis kuantitatif karena Pengendalian berbasis massa tidak memerlukan konversi densitas sebagaimana metode volumetrik dan tidak sepenuhnya bergantung pada kestabilan debit. Meskipun demikian, akurasi pembacaan massa tetap dapat dipengaruhi oleh kondisi mekanis, temperatur sensor, getaran, pemasangan *load cell*, dan pengolahan data.

Metode gravimetri dalam analisis kuantitatif dilakukan dengan mengisolasi suatu komponen dan menentukan jumlahnya melalui proses penimbangan hingga diperoleh massa yang stabil. Prinsip ini menunjukkan bahwa kuantitas material dapat ditentukan secara akurat melalui pengukuran berat residu yang dihasilkan. Konversi material ke bentuk yang dapat ditimbang menjadi dasar penting dalam memperoleh hasil analisis yang presisi.

Selain itu, dalam metode gravimetri, proses pengukuran dilakukan hingga mencapai bobot konstan, yang menandakan bahwa perubahan massa tidak lagi terjadi dan hasil penimbangan telah stabil. Massa konstan menunjukkan bahwa proses

pemisahan atau reaksi telah selesai sehingga nilai yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar perhitungan kuantitatif. Stabilitas massa ini menjadi indikator penting dalam memastikan ketepatan pada hasil pengukuran. Penggunaan metode gravimetri juga menekankan bahwa pengukuran berbasis massa memberikan tingkat ketelitian tinggi karena tidak memerlukan standar pembanding yang kompleks dan bergantung pada akurasi sistem penimbangan. Pendekatan ini banyak digunakan untuk menentukan kandungan zat atau komposisi material secara presisi melalui proses pengendapan, pengeringan, dan penimbangan hasil akhir [19].

Dalam sistem *gravimetric, load cell* digunakan untuk mengubah gaya berat menjadi sinyal listrik melalui deformasi strain gauge. Sinyal tersebut diperkuat dan diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan massa aktual, kemudian dibandingkan dengan nilai target. Ketika massa mendekati target, sistem dapat mengurangi laju aliran atau menghentikan aktuator untuk mencegah kelebihan pengisian. Karena keputusan pengendalian didasarkan pada umpan balik hasil pengukuran, metode ini termasuk sistem *closed-loop control* yang mampu menjaga akurasi dan *repeatability* proses.

a. Laju pengisian massa

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.5)$$

di mana:

- $\dot{m}$ = laju pengisian massa (g/s)
- Δm = perubahan massa (g)
- Δt = selang waktu pengisian (s)
- Perubahan massa dapat dihitung dari selisih antara massa akhir dan massa awal.

$$\Delta m = m_{akhir} - m_{awal} \quad (2.6)$$

- Sedangkan perubahan waktu diperoleh dari selisih waktu akhir dan waktu awal.

$$\Delta t = t_{akhir} - t_{awal} \quad (2.7)$$

b. Error pengisian

$$e_m = m_{target} - m_{actual} \quad (2.8)$$

c. Persentase error

$$error(\%) = \frac{|m_{target} - m_{actual}|}{m_{target}} \times 100\% \quad (2.9)$$

d. *Two-stage Dosing*

$$\Delta m_{threshold} = \dot{m} \times t_{delay} \quad (2.10)$$

Dimana :

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

- $\dot{m}$ = laju aliran massa (gram per detik)
- Δm = perubahan massa (gram)
- Δt = perubahan waktu (detik)

$$t_{delay} = t_{respons} - t_{perintah} \quad (2.11)$$

- t_{delay} = waktu keterlambatan sistem (s)
- $t_{respons}$ = waktu ketika massa benar-benar berhenti bertambah (s)
- $t_{perintah}$ = waktu ketika mikrokontroler memberikan perintah pompa OFF (s)

$$m_{stop} = m_{target} - m_{delay} \quad (2.12)$$

- $m_{berhenti}$ = massa saat pompa dihentikan
- m_{target} = massa target
- $\Delta m_{threshold}$ = kompensasi massa akibat delay

Maka *Two-stage Dosing* dengan ketentuan :

$$PWM = \begin{cases} PWM_{high}, & m_{actual} < m_{target,i} - \Delta m_{th} \\ PWM_{low}, & m_{target,i} - \Delta m_{th} \leq m_{actual} < m_{target,i} - O_{final} \\ 0, & m_{actual} \geq m_{target,i} - O_{final} \end{cases} \quad (2.13)$$

- PWM = nilai sinyal PWM yang diberikan ke pompa.
- PWM_{high} = nilai PWM tahap cepat (255).
- PWM_{low} = nilai PWM tahap presisi (120).
- m_{actual} = massa aktual hasil pembacaan *load cell* (g).
- $m_{target,i}$ = massa target komponen ke-*i* (g).

- Δm_{th} = massa ambang (*threshold*) untuk perpindahan dari PWM 255 ke PWM 120 (g).
- O_{final} = nilai kompensasi penghentian pompa (*stop compensation*) untuk mengantisipasi sisa aliran setelah pompa dimatikan (g).

Pompa bekerja pada PWM tahap cepat (PWM_{high})

selama massa aktual masih lebih kecil dari batas perpindahan ($m_{target,i} - \Delta m_{th}$).

Ketika massa aktual telah mencapai batas tersebut, sistem menurunkan kecepatan pompa menjadi PWM tahap presisi (PWM_{low}) agar laju penambahan massa lebih kecil. Selanjutnya, pompa dihentikan ketika massa aktual telah mencapai batas penghentian ($m_{target,i} - O_{final}$). Nilai O_{final} digunakan sebagai kompensasi terhadap sisa aliran (*overshoot*) yang masih keluar setelah pompa dimatikan sehingga massa akhir mendekati target yang ditentukan.

Pada metode *Gravimetric Dosing*, pengendalian jumlah bahan dilakukan berdasarkan massa yang terbaca oleh sensor *load cell*. Massa cat yang masuk ke wadah pencampur dibaca secara langsung oleh *load cell* melalui modul HX711, kemudian nilai tersebut digunakan sebagai umpan balik untuk menentukan kondisi kerja pompa. Apabila massa yang terbaca belum mencapai target, pompa tetap bekerja. Ketika massa mendekati target, kecepatan pompa dapat diturunkan, dan ketika massa telah mencapai batas yang ditentukan, pompa dihentikan. Dalam penerapannya, pembacaan *load cell* dapat mengalami fluktuasi kecil akibat noise sensor, getaran mekanik, atau perubahan sinyal pada modul HX711. Fluktuasi tersebut dapat memengaruhi keputusan sistem, terutama ketika massa cat sudah mendekati target. Oleh karena itu, data pembacaan massa diproses menggunakan metode moving average sebelum digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan[20].

Moving average merupakan metode perataan data dengan cara menghitung rata-rata dari beberapa data pembacaan terakhir. Metode ini digunakan agar nilai massa yang dibaca sistem menjadi lebih stabil dan tidak terlalu dipengaruhi oleh perubahan kecil sesaat. Persamaan moving average dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MA = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (2.14)$$

Keterangan:

- MA adalah nilai rata-rata bergerak
- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ adalah data pembacaan massa
- n adalah jumlah data yang dirata-ratakan.

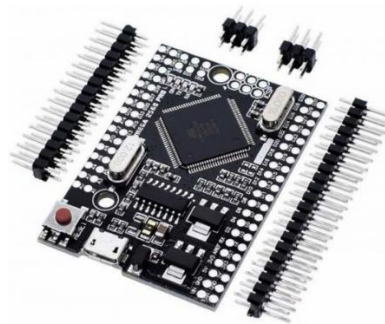
Pada sistem ini, hasil moving average digunakan sebagai nilai massa utama untuk proses dosing. Dengan demikian, keputusan pompa tidak diambil dari satu data pembacaan tunggal, melainkan dari hasil rata-rata beberapa pembacaan.

2.4. Komponen Sistem

2.4.1. Arduino Mega Pro mini

Arduino Mega 2560 Pro Mini merupakan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang digunakan sebagai pusat pengendali sistem elektronik dan otomasi. Board ini dirancang untuk memproses data dari sensor serta mengontrol aktuator sesuai logika program yang ditanamkan melalui perangkat lunak arduino IDE berbasis bahasa C/C++. Platform arduino bersifat open-source sehingga memudahkan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak dalam pengembangan sistem kontrol otomatis.

arduino Mega 2560 Pro Mini menyediakan jumlah pin input/output yang besar cocok digunakan pada sistem yang membutuhkan banyak komponen I/O. Board ini memiliki 54 pin digital I/O, dengan beberapa pin mendukung keluaran PWM untuk pengaturan kecepatan motor atau aktuator, serta pin input analog untuk membaca sinyal sensor. Bentuk fisik modul mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3. arduino Mega 2560 Pro Mini [21]

Berdasarkan Gambar 2.3, Arduino Mega Pro Mini digunakan sebagai pengendali utama sistem. Selain itu, tersedia beberapa port komunikasi serial (UART) yang dapat komunikasi dengan perangkat lain seperti modul sensor, komputer, maupun sistem embedded lainnya. Dari sisi kelistrikan, board ini beroperasi pada tegangan kerja 5V dengan tegangan masukan yang direkomendasikan sekitar 7–12V. Memori flash berkapasitas besar serta kecepatan clock 16 MHz memungkinkan mikrokontroler menjalankan program kontrol dan pengolahan data sensor [21].

Spesifikasi teknis Arduino Mega Pro Mini yang digunakan sebagai pengendali utama pada alat ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Spesifikasi Aruino mega pro mini

Komponen	Spesifikasi
<i>Microcontroller</i>	Atmega2560
Tegangan operasi	5V
Tegangan input (disarankan)	7-12V
Tegangan input (batas)	6-20V
Digital I/O	54 PIN
PWM digital I/O	15 PIN
Input analog	16 PIN
Arus DC per pin I/O	20mA
Arus DC pin 3.3V	50 Ma
<i>Flash memory</i>	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Kecepatan <i>clock</i>	16 MHz
LED bawaan	Pin 13
Dimensi	101,52 x 53,3 mm
Berat	37 gram

Berdasarkan Tabel 2.2, Arduino Mega Pro Mini memiliki spesifikasi yang mendukung kebutuhan sistem.

2.4.2. Raspberry Pi 4 Modul B

Raspberry Pi merupakan komputer papan tunggal (single board computer / SBC) berukuran kecil yang dikembangkan oleh raspberry Pi Foundation untuk mendukung pengembangan sistem komputasi berbiaya rendah. Perangkat ini memiliki ukuran sekitar sebesar kartu kredit namun telah dilengkapi dengan prosesor, memori, serta berbagai antarmuka komunikasi sehingga dapat berfungsi seperti komputer mini[22]. Perangkat raspberry Pi 4B yang digunakan sebagai unit pemroses ditampilkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Raspberry pi 4B[23]

Berdasarkan Gambar 2.4, Raspberry Pi 4B digunakan untuk pengolahan citra dan komunikasi data. Raspberry Pi 4 Model B menggunakan prosesor ARM Cortex-A72 quad-core 64-bit dengan kecepatan hingga sekitar 1.5 GHz serta mendukung berbagai antarmuka seperti USB, HDMI, Ethernet, dan GPIO yang memungkinkan perangkat terhubung dengan sensor maupun aktuator pada sistem embedded. Selain itu, perangkat ini dapat menjalankan sistem operasi berbasis Linux seperti raspbian yang bersifat open source sehingga memudahkan pengembangan perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman seperti Python[24].

Spesifikasi raspberry Pi 4B yang berperan sebagai unit pemroses pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Spesifikasi raspberry pi 4B

Komponen	Spesifikasi
----------	-------------

Prosesor	Broadcom BCM2712, Quad-core Arm Cortex-A76 64-bit @ 2.4 GHz
GPU	VideoCore VII (OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.2)
Memori (RAM)	LPDDR4X-4267 (opsi 1GB, 2GB, 4GB, 8GB, 16GB)
<i>Output Display</i>	Dual micro-HDMI, hingga 4Kp60 HDR
<i>Video Decode</i>	4Kp60 HEVC decoder
Konektivitas	Wi-Fi 802.11ac dual-band, Bluetooth 5.0 / BLE
USB	2× USB 3.0 (5Gbps), 2× USB 2.0
Jaringan	Gigabit Ethernet (PoE+ via HAT)
Penyimpanan	Slot microSD (mode SDR104 <i>HIGH</i> speed)
Kamera	2× MIPI 4-lane transceivers
Ekspansi	PCIe 2.0 x1 interface
GPIO	Header standar 40-pin
Catu daya	5V DC via USB-C (Power Delivery), hingga 5A
Suhu Operasi	0°C – 70°C

2.4.3. Pompa Peristaltik NKP-DC-S10B

Pompa peristaltik merupakan jenis pompa perpindahan positif yang bekerja dengan prinsip kompresi mekanis pada selang fleksibel untuk mendorong fluida. Fluida dipindahkan melalui selang elastis yang ditekan oleh roller yang berputar mengikuti gerakan rotor, sehingga terbentuk tekanan lokal yang mendorong cairan maju secara kontinu. Mekanisme ini memungkinkan fluida bergerak tanpa kontak langsung dengan komponen mekanik pompa, sehingga risiko kontaminasi dapat diminimalkan dan kebersihan fluida tetap terjaga [25]. Bentuk fisik pompa peristaltik yang digunakan dalam sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. *Peristaltik NKP-DC-S10 [26]*

Berdasarkan Gambar 2.5, pompa peristaltik digunakan untuk mengalirkan cat menuju mixing tank. Manual teknis produk NKP-DC-S10B menjelaskan bahwa pompa ini dirancang untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi seperti sistem dispensing cairan, peralatan medis, serta perangkat otomasi. Desain pompa memungkinkan cairan hanya bersentuhan dengan selang, sehingga aman digunakan untuk berbagai jenis cairan dan memudahkan proses perawatan serta penggantian selang. Selain itu, kemampuan integrasi dengan sistem kontrol digital menjadikan pompa ini sesuai untuk aplikasi otomasi berbasis mikrokontroler [26]

Spesifikasi modul NKP-DC-S10B yang digunakan dalam rangkaian sistem dapat dilihat pada Tabel 2.4.

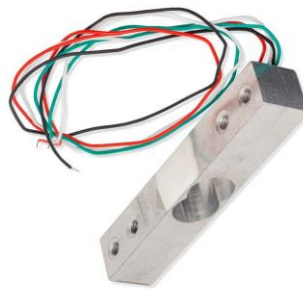
Tabel 2. 4. Spesifikasi NKP-DC-S10B

Komponen	Spesifikasi
Model	NKP-DC-S10B
Tegangan	12V DC
Arus	0.25A
<i>FLOW Rate</i>	5.2 ~ 90 ml/min
<i>Sound Level</i>	40 dB
<i>Product Dimensions (L x W x H)</i>	67mm x 55mm x 41mm
Bahan	Plastik
<i>Pump Tube Size</i>	3mm x 5mm
<i>Pump Tube Type</i>	<i>Silica gel tube</i>

2.4.4. *Load cell* 10 kg dan Modul HX711

2.4.4.1. *load cell*

load cell tipe strain gauge umumnya menggunakan konfigurasi jembatan Wheatstone dengan empat strain gauge untuk meningkatkan sensitivitas dan mengurangi pengaruh suhu. Sebagian gauge bekerja dalam kondisi tarik dan sebagian lainnya dalam kondisi tekan, sehingga perubahan resistansi akibat temperatur dapat saling mengompensasi. Pendekatan ini menjadikan *load cell* dapat menghasilkan pengukuran yang stabil dan akurat meskipun terjadi variasi suhu lingkungan. *load cell* bekerja dengan prinsip deformasi elastis, di mana gaya yang diberikan menghasilkan perubahan bentuk yang sangat kecil pada elemen struktural. Perubahan ini kemudian diterjemahkan menjadi perubahan tegangan listrik pada rangkaian jembatan. Besarnya sinyal keluaran sangat kecil (dalam orde millivolt per volt), sehingga diperlukan rangkaian penguat dan konverter analog-ke-digital untuk memproses sinyal menjadi data berat yang dapat dibaca oleh sistem mikrokontroler. Bentuk fisik sensor *load cell* yang digunakan sebagai sensor pembaca massa ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6. *load cell* [27]

Berdasarkan Gambar 2.6, *load cell* berfungsi mengukur massa cairan pada sistem. Berdasarkan spesifikasi teknis, *load cell* memiliki kapasitas pengukuran hingga 10 kg. Sensor ini dirancang untuk memberikan respon linier terhadap beban, dengan kesalahan non-linearitas, histeresis, dan *non-repeatability* yang sangat kecil [27].

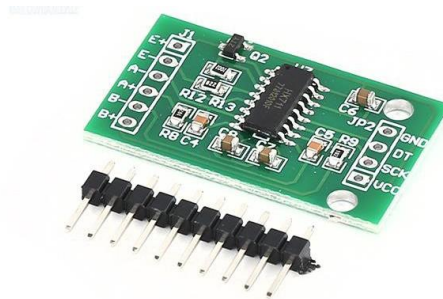
Spesifikasi *load cell* yang digunakan sebagai sensor pengukuran massa ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5. Spesifikasi *load cell*

Komponen	Spesifikasi
<i>Housing Material</i>	<i>Aluminum Alloy</i>
Tegangan	5V DC
Kapasitas	10 kg
Dimensi	55.25x12.7x12.7mm
Ukuran Kabel	30 AWG (0.2mm)
<i>Mounting Holes</i>	M5 (Screw Size)

2.4.4.2. Modul HX711

Modul HX711 merupakan penguat sinyal dan konverter analog-ke-digital (ADC) beresolusi tinggi yang dirancang khusus untuk sistem penimbangan digital menggunakan sensor jembatan Wheatstone seperti *load cell*. Modul ini memperkuat sinyal diferensial berlevel sangat kecil dari *load cell* dan mengubahnya menjadi data digital sehingga dapat diproses oleh mikrokontroler. Modul penguat sinyal yang digunakan bersama load cell ditunjukkan pada Gambar 2.7.

**Gambar 2. 7** Modul HX711 [28]

Berdasarkan Gambar 2.7, modul HX711 digunakan untuk membaca sinyal dari load cell. HX711 memiliki ADC 24-bit dengan penguat diferensial internal yang dapat membaca perubahan sinyal kecil secara akurat. Modul ini bekerja dengan tegangan operasi rendah dan mampu menghasilkan pembacaan data yang konsisten, sehingga banyak digunakan pada aplikasi timbangan digital dan sistem pengukuran massa presisi. Dalam penggunaannya, Modul HX711 merupakan konverter analog-ke-digital 24-bit yang dirancang untuk sistem penimbangan berbasis sensor jembatan. Modul ini

dilengkapi programmable gain amplifier dan dapat dioperasikan pada laju keluaran 10 SPS atau 80 SPS [29]

Spesifikasinya adalah seperti berikut ini:

- a. *Differential input voltage: $\pm 40mV$ (Full-scale differential input voltage $\pm 40mV$)*
- b. Resolusi ADC: 24-bit
- c. Laju data: 10 SPS atau 80 SPS
- d. Tegangan operasi modul: menyesuaikan rangkaian, pada sistem digunakan 5 V
- e. *Operating current : $<10 mA$*
- f. *Size: $38mm*21mm*10mm$.*

2.4.4.3. Kalibrasi dan Konversi Pembacaan *load cell*

Kalibrasi *load cell* dilakukan untuk mengubah data RAW dari modul HX711 menjadi nilai massa dalam satuan gram. Proses kalibrasi diperlukan karena nilai RAW yang dihasilkan HX711 tidak secara langsung menunjukkan berat sebenarnya. Nilai RAW tanpa beban digunakan sebagai offset, sedangkan nilai RAW saat diberi beban standar digunakan untuk menentukan faktor kalibrasi.

Faktor kalibrasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Faktor\ Kalibrasi = \frac{RAW_{beban} - RAW_0}{Beban} \quad (2.15)$$

Keterangan:

- RAW bebana adalah nilai RAW HX711 ketika *load cell* diberi beban standar,
- RAW 0 adalah nilai RAW HX711 ketika *load cell* tanpa beban,
- Beban adalah massa beban standar dalam satuan gram.

Setelah faktor kalibrasi diperoleh, nilai RAW dapat dikonversi menjadi berat menggunakan persamaan berikut:

$$Berat = \frac{RAW - Offset}{Faktor\ Kalibrasi} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- Berat adalah hasil pembacaan massa dalam satuan gram,
- Raw adalah data mentah yang terbaca dari HX711,
- Offset adalah nilai RAW pada kondisi tanpa beban,

- Faktor Kalibrasi adalah nilai hasil perhitungan kalibrasi.

Pada sistem ini, proses kalibrasi digunakan agar pembacaan massa dari *load cell* dapat menjadi dasar pengendalian proses pencampuran cat. Setelah data RAW dikonversi menjadi satuan gram, nilai massa tersebut dapat digunakan untuk menentukan apakah pompa tetap aktif, diperlambat, atau dihentikan sesuai target massa yang telah ditentukan.

Untuk mengevaluasi hasil kalibrasi, digunakan nilai error pembacaan. Error menunjukkan besar penyimpangan antara berat terbaca dan beban asli. Persamaan error dituliskan sebagai berikut:

$$Error(\%) = \frac{| \text{Beban Asli} - \text{Berat Terbaca} |}{\text{Beban Asli}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Selain persentase error, tingkat akurasi pembacaan *load cell* juga perlu dihitung untuk mengetahui seberapa dekat hasil pembacaan sensor terhadap beban asli yang digunakan sebagai acuan, Akurasi pembacaan *load cell* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%)$$

Keterangan:

- Akurasi = tingkat kedekatan hasil pembacaan sensor terhadap beban asli (%)
- Error = persentase selisih antara beban asli dan berat terbaca

2.4.4.4. Evaluasi Akurasi dan Presisi Pembacaan *load cell*

Presisi menunjukkan tingkat konsistensi hasil pembacaan *load cell* ketika pengukuran dilakukan secara berulang pada beban yang sama. Presisi tidak hanya dilihat dari kedekatan hasil pembacaan terhadap beban asli, tetapi dari seberapa kecil penyebaran hasil pengukuran berulang. Dalam evaluasi pengukuran, presisi dapat dinyatakan menggunakan standar deviasi atau koefisien variasi. Pedoman validasi metode analitik ICH Q2(R2) menyatakan bahwa presisi dari serangkaian pengukuran dapat dinyatakan melalui variance, standard deviation, atau Koefisien Variasi [30]. Standar deviasi digunakan untuk mengetahui sebaran hasil pembacaan terhadap nilai rata-rata. Rumus standar deviasi sampel adalah:

$$\text{Standar Deviasi} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

SD adalah standar deviasi,

x_i adalah data pembacaan pada setiap percobaan,

$\bar{x}$ adalah nilai rata-rata hasil pembacaan,

n adalah jumlah pengulangan pengukuran.

Selain standar deviasi, presisi juga dapat dianalisis menggunakan koefisien variasi atau Koefisien Variasi. Koefisien variasi menunjukkan besar penyebaran hasil pengukuran relatif terhadap nilai rata-ratanya, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan kestabilan pembacaan pada beberapa titik beban yang berbeda.

Rumus koefisien variasi adalah:

$$KV(\%) = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2.19)$$

Keterangan:

KV adalah koefisien variasi (%);

SD adalah standar deviasi hasil pengukuran,

$\bar{x}$ *relat* adalah rata-rata hasil pengukuran

Koefisien variasi digunakan untuk menunjukkan besar penyebaran hasil pengukuran relatif terhadap nilai rata-ratanya. Koefisien variasi dihitung dari perbandingan antara standar deviasi dan rata-rata hasil pengukuran. Nilai koefisien variasi yang semakin kecil menunjukkan bahwa variasi relatif hasil pengukuran semakin rendah [31].

2.4.4.5. Linearitas dan Koefisien Determinasi

Linearitas menunjukkan kemampuan sensor dalam menghasilkan perubahan keluaran yang sebanding dengan perubahan nilai masukan pada suatu rentang pengukuran. Pada *load cell*, linearitas dapat dianalisis dengan menerapkan regresi linier antara massa standar sebagai variabel independen dan massa hasil pembacaan sensor sebagai variabel dependen. Persamaan regresi linier digunakan untuk membentuk garis yang mewakili hubungan antara kedua variabel tersebut.

Tingkat kesesuaian data pengukuran terhadap model regresi dapat diketahui melalui koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 menunjukkan bagian variasi pada variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen melalui model regresi. Nilai yang semakin mendekati satu menunjukkan bahwa titik-titik pengukuran semakin dekat dengan garis regresi. Esposito dkk. melakukan kalibrasi statis *load cell* menggunakan beban yang diketahui dan memperoleh nilai $R^2 = 0,99$, yang digunakan untuk mengonfirmasi perilaku linier *load cell* tersebut [32].

Meskipun demikian, nilai R^2 tidak digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menilai kinerja sensor. Koefisien determinasi menunjukkan kesesuaian data terhadap model regresi, tetapi tidak secara langsung menunjukkan akurasi sensor. Oleh karena itu, analisis linearitas perlu dilengkapi dengan evaluasi error, standar deviasi, dan koefisien variasi. Kajian mengenai praktik kalibrasi juga menjelaskan bahwa nilai R^2 menggambarkan proporsi variasi respons yang dijelaskan oleh model regresi, tetapi nilai yang mendekati satu belum cukup digunakan sendiri untuk membuktikan linearitas suatu prosedur kalibrasi [33].

Dengan persamaan sebagai berikut :

Keterangan:

- R^2 = koefisien determinasi;
- y_i = hasil pembacaan sensor ke- i ;
- $\hat{y}_i$ = hasil prediksi berdasarkan persamaan regresi;
- $\bar{y}$ = rata-rata hasil pembacaan;
- n = jumlah data pengujian.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.20)$$

2.4.5. Motor DC 555 12V

2.4.5.1. Spesifikasi dan Gambaran umum

Motor DC merupakan perangkat elektromekanik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa gerakan putar. Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara medan magnet dan arus listrik yang mengalir pada kumparan motor. Ketika arus listrik dialirkan, medan magnet yang dihasilkan akan

berinteraksi dengan magnet permanen sehingga menghasilkan torsi yang menyebabkan rotor berputar. Besarnya kecepatan putar dan torsi motor dipengaruhi oleh tegangan kerja, karakteristik motor, serta beban yang diberikan pada poros motor.

Pada penelitian ini digunakan motor DC tipe 555 *HIGH* Torque Planetary Geared Motor dengan kecepatan keluaran 430 RPM pada tegangan kerja 12 VDC. Motor ini dipilih karena memiliki torsi yang relatif besar sehingga mampu digunakan sebagai penggerak sistem pengaduk cat. Penggunaan planetary gearbox pada motor berfungsi untuk menurunkan kecepatan putar motor sekaligus meningkatkan torsi keluaran sehingga motor dapat bekerja lebih stabil saat mengaduk fluida dengan viskositas tertentu.

Berdasarkan spesifikasi produk, motor yang digunakan memiliki torsi sebesar 5 N·m, daya 10 W, tingkat perlindungan IP44, serta menggunakan sistem transmisi planetary gear reducer. Motor ini juga dilengkapi dengan kumparan tembaga (pure copper coils), magnet berkekuatan tinggi (*HIGH*-strength magnets), dan konstruksi logam penuh (all-metal construction) yang mendukung umur pakai yang lebih panjang. Selain itu, motor dapat dikendalikan menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM) sehingga kecepatan putar dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses pengadukan. Dengan karakteristik tersebut, motor DC 555 planetary gear 430 RPM dinilai sesuai untuk digunakan sebagai aktuator utama pada sistem pencampuran cat otomatis yang dikembangkan dalam penelitian ini [34]. Bentuk fisik motor yang digunakan sebagai aktuator pengaduk ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8. 555 *HIGH* Torque [34]

Berdasarkan Gambar 2.7, modul HX711 digunakan untuk membaca sinyal dari load cell. Spesifikasi motor DC 555 yang digunakan sebagai penggerak pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6. Spesifikasi Motor 555

Parameter	Spesifikasi
Tipe Motor	555 <i>HIGH</i> Torque Planetary Geared Motor
Tegangan Kerja	12 VDC
Kecepatan Output	430 RPM
Torsi	5 N·m
Daya	10 W
Proteksi	IP44
Sistem Gear	Planetary Gear Reducer
Material Kumpanan	Tembaga Murni
Bahan	Full Metal

2.4.5.2. Perhitungan Kebutuhan Torsi Pengaduk Cat

2.4.5.2.1. Konversi Viskositas

Viskositas cat yang dinyatakan dalam satuan centipoise (cP) perlu dikonversi ke satuan SI, yaitu Pascal-second (Pa.s), agar dapat digunakan pada perhitungan bilangan Reynolds.

$$\mu_{Pa.s} = \mu_{cP} \times 0,001 \quad (2.21)$$

Keterangan:

μ = viskositas dinamis fluida

cP = centipoise

Pa.s = Pascal-second

2.4.5.2.2. Konversi Kecepatan Putar

Kecepatan putar motor umumnya dinyatakan dalam satuan rotation per minute (RPM). Untuk perhitungan pengadukan, kecepatan putar perlu dikonversi menjadi putaran per detik.

$$n = \frac{N}{60} \quad (2.22)$$

Keterangan:

n = kecepatan putar dalam satuan s^{-1}

N = kecepatan putar motor dalam RPM

2.4.5.2.3. Bilangan Reynolds pada Proses Pengadukan

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengetahui jenis aliran pada proses pengadukan. Nilai Reynolds dipengaruhi oleh densitas fluida, kecepatan putar impeller, diameter impeller, dan viskositas fluida.

$$Re = \frac{\rho n D^2}{\mu} \quad (2.23)$$

Keterangan:

Re = bilangan Reynolds

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

D = diameter impeller (m)

μ = viskositas dinamis fluida (Pa.s)

Pada proses pengadukan, nilai Re yang kecil menunjukkan bahwa aliran cenderung laminar. Pada perancangan ini, aliran dikategorikan laminar apabila nilai Re kurang dari 10.

2.4.5.2.4. Power Number

Power number merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk memperkirakan kebutuhan daya pengadukan.

Pada perhitungan ini digunakan nilai konstanta $K = 70$, sehingga:

$$N_p = \frac{70}{Re} \quad (2.24)$$

Keterangan:

N_p = power number

K = konstanta empiris pada daerah aliran laminar

Re = bilangan Reynolds

2.4.5.2.5. Daya Pengadukan

Daya pengadukan dipengaruhi oleh power number, densitas fluida, kecepatan putar, dan diameter impeller. Semakin besar diameter impeller atau kecepatan putar, semakin besar daya yang diperlukan.

$$P = N_p \rho n^3 D^5 \quad (2.25)$$

Keterangan:

P = daya pengadukan (W)

N_p = power number

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

D = diameter impeller (m)

2.4.5.2.6. Kecepatan Sudut

Kecepatan sudut diperlukan untuk menghitung torsi. Nilai ini diperoleh dari kecepatan putar dalam satuan putaran per detik.

$$\omega = 2\pi n \quad (2.26)$$

Keterangan:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

π = konstanta 3,14

n = kecepatan putar impeller (s^{-1})

2.4.5.2.7. Torsi Pengadukan

Torsi pengadukan adalah momen gaya yang dibutuhkan motor untuk memutar impeller dalam fluida. Nilai torsi diperoleh dari hubungan antara daya dan kecepatan sudut.

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (2.27)$$

Keterangan:

T = torsi pengadukan (N.m)

P_m = daya pengadukan terkoreksi (W)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

2.4.5.2.8. Konversi Torsi

Torsi motor pada spesifikasi komponen sering dinyatakan dalam kg.cm. Oleh karena itu, hasil torsi dalam satuan N.m dikonversi ke kg.cm.

$$T_{kg.cm} = T_{N.m} \times 10,197 \quad (2.28)$$

2.4.5.2.9. Faktor Keamanan dan Faktor Shaft

Faktor keamanan atau *safety factor* merupakan nilai koreksi yang digunakan untuk memberikan batas aman pada suatu komponen agar tetap mampu bekerja meskipun menerima beban yang lebih besar dari hasil perhitungan teoritis. Pada perancangan poros, faktor keamanan diperlukan karena kondisi kerja aktual tidak selalu sama dengan kondisi ideal, terutama apabila terdapat kemungkinan beban tambahan, rugi mekanik, atau ketidakpastian pada data perhitungan. Samudra dan Haris menjelaskan bahwa faktor keamanan berfungsi sebagai pengaman pada poros apabila poros menerima beban di luar atau melebihi hasil perhitungan, sehingga komponen yang dirancang tidak mengalami kegagalan saat digunakan[35].

Faktor koreksi poros digunakan untuk memperhitungkan kondisi pembebanan aktual pada poros yang tidak selalu bekerja secara ideal. Pada perancangan poros, faktor koreksi momen puntir atau faktor koreksi tumbukan digunakan berdasarkan karakteristik beban. Untuk beban halus digunakan nilai 1,0, untuk beban dengan sedikit kejutan atau tumbukan digunakan nilai 1,0–1,5, sedangkan untuk beban dengan kejutan atau tumbukan berat digunakan nilai 1,5–3,0[36].

Maka rumus yang di gunakan dalam perhitungan akhir yaitu :

$$T_{motor} = T \times SF \quad (2.29)$$

$$T_{akhir} = T_{motor} \times K_s \quad (2.30)$$

Keterangan:

T_{motor} = torsi motor setelah faktor keamanan

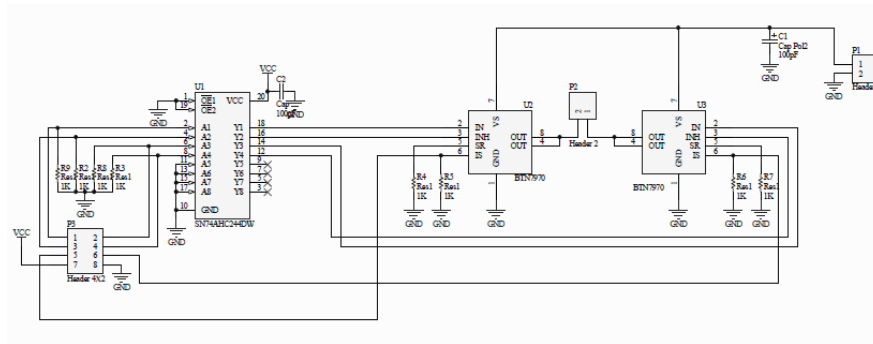
T_{akhir} = torsi akhir perancangan

SF = faktor keamanan

K_s = faktor shaft

2.4.6. Drive Module BTS7960

Driver motor BTS7960 merupakan modul pengendali motor DC berbasis rangkaian full H-bridge yang digunakan untuk mengatur arah putaran dan kecepatan motor secara elektronik. Modul ini agar motor berputar searah maupun berlawanan arah jarum jam dengan mengendalikan polaritas tegangan yang diberikan ke motor. Skematik driver motor yang digunakan untuk mengendalikan motor DC ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9. Skematik BTS7960 [37]

Detail Pin Input :

- 1.RPWM = Input PWM Forward Level ,Aktif *HIGH*
- 2.LPWM = Input PWM Reverse Level ,Aktif *HIGH*
- 3.R_EN = Input Enable Forward Driver, Aktif *HIGH*
- 4.L_E = Input Enable Reverse Driver, Aktif *HIGH*
- 5.R_IS = Forward Drive ,Side current alarm output
- 6.L_IS = Reverse Drive,Side current alarmoutput
- 7.Vcc = +5 V Power Supply Mikrokontroler
- 8.Gnd = Gnd Power Supply Mikrokontroler

Berdasarkan Gambar 2.9, BTS7960 digunakan sebagai driver motor DC. BTS7960 dapat menerima arus tinggi hingga sekitar 43 A dan bekerja pada tegangan suplai sekitar 6-27 V DC, sehingga sesuai untuk aplikasi yang memerlukan penggerak motor berdaya besar. Modul ini juga mendukung pengendalian menggunakan sinyal Pulse

Width Modulation (PWM) sehingga kecepatan motor dapat diatur secara efisien dan presisi sesuai kebutuhan beban.

Selain kemampuan pengendalian daya tinggi, driver BTS7960 dilengkapi sistem proteksi terhadap arus berlebih dan panas berlebih untuk menjaga keandalan sistem. Antarmuka logika 3,3–5 V memungkinkan modul ini dikendalikan langsung oleh mikrokontroler seperti arduino[37].

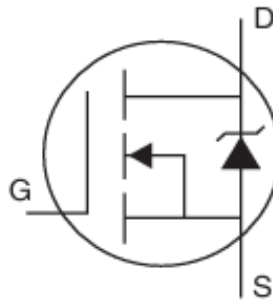
Dibawah ini merupakan spesifikasi Drive Module BTS7960 :

- Double BTS7960 *HIGH* current (43A) H-bridge drivers
- Input voltage: 6V-27V
- Model: IBT-2
- Maximum current: 43A
- Input level: 3.3-5V
- Control mode: PWM or level

2.4.7. MOSFET IRLZ44N

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) merupakan komponen semikonduktor yang banyak digunakan sebagai saklar elektronik dan penguat sinyal dalam rangkaian sistem kontrol daya. Berbeda dengan transistor bipolar, MOSFET dikendalikan oleh tegangan pada terminal gate sehingga arus yang dibutuhkan untuk pengendalian sangat kecil. Karakteristik ini menjadikan MOSFET efisien digunakan sebagai pengendali beban berarus besar yang dikontrol oleh mikrokontroler

MOSFET tipe N-channel seperti IRLZ44N bekerja dengan mengatur aliran arus antara terminal drain dan source berdasarkan tegangan gate-source (VGS). Ketika tegangan gate melebihi tegangan ambang, kanal konduksi terbentuk sehingga arus dapat mengalir ke beban. Karena arus gate sangat kecil, MOSFET sering disebut sebagai perangkat yang dikendalikan tegangan (voltage controlled device) dan berfungsi efektif sebagai saklar elektronik berkecepatan tinggi [38] Simbol skematik komponen MOSFET N-channel ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10. simbol skematik MOSFET N-channel [39]

Berdasarkan Gambar 2.10, MOSFET IRLZ44N berfungsi sebagai sakelar elektronik. IRLZ44N termasuk MOSFET logic-level yang dapat diaktifkan langsung oleh sinyal logika 5V dari mikrokontroler. Komponen ini memiliki resistansi drain-source rendah saat aktif ($R_{DS(on)}$) sehingga kerugian daya dan panas yang dihasilkan menjadi kecil. Berdasarkan karakteristik, MOSFET ini mampu menangani arus besar dan memiliki tegangan drain-source maksimum sekitar 55 V, sehingga cocok digunakan untuk mengendalikan motor DC, pompa, dan beban induktif lainnya.

Spesifikasi MOSFET IRLZ44N yang berfungsi sebagai saklar elektronik pada rangkaian driver ditunjukkan pada Tabel 2.7.

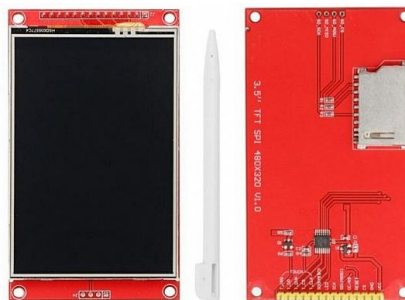
Tabel 2. 7. spesifikasi Mosfet IRLZ44N

Komponen	Spesifikasi
Tipe MOSFET	N-Channel
V_{DS} (Drain-Source Voltage)	55V
I_D (Drain Current)	47A
$V_{GS(th)}$	1-2V
Gate Drive Optimal	4-5V
$R_{DS(on)}$	$\approx 0.022 \Omega$
Power Dissipation (P_d)	± 94 W
Gate-Source Voltage Max	± 16 V
Switching Speed	Fast
Body Diode	available
Package	TO-220

2.4.8. LCD TFT 3.5 inch

Thin Film Transistor Liquid Crystal Display (TFT LCD) merupakan jenis layar berbasis matriks aktif yang menggunakan transistor tipis pada setiap piksel untuk mengendalikan intensitas cahaya secara individual. Teknologi ini memungkinkan tampilan grafis dengan resolusi tinggi dan respons visual yang stabil. Pada sistem berbasis mikrokontroler, TFT LCD berfungsi sebagai antarmuka operator (Human Machine Interface/HMI) untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor maupun status kerja sistem.

Dalam penelitian yang menggunakan arduino mega pro mini sebagai pengolah data, TFT LCD 3.6 inch dimanfaatkan untuk menampilkan hasil pengolahan sinyal secara *realtime*. Data analog dari sensor terlebih dahulu dikonversi oleh ADC internal arduino, kemudian diproses dan divisualisasikan dalam bentuk numerik maupun grafik pada layar TFT. Integrasi ini menunjukkan bahwa mikrokontroler tidak hanya berperan sebagai pengendali, tetapi juga sebagai pengolah dan penyaji informasi secara langsung [40]. Bentuk fisik modul layar yang digunakan sebagai antarmuka pengguna ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11. *LCD Display Module 3.6 Inch [41]*

Berdasarkan Gambar 2.11, LCD TFT digunakan sebagai antarmuka pengguna. TFT LCD yang digunakan pada sistem arduino umumnya memiliki resolusi 480×320 piksel dengan antarmuka paralel 16-bit atau 8-bit. Berdasarkan penelitian perancangan alat ukur berbasis arduino Mega, layar TFT 3.6 inch digunakan untuk menampilkan hasil konversi nilai sensor yang telah diproses oleh mikrokontroler. Tegangan kerja modul TFT biasanya 5 V untuk logika internal, sementara papan arduino Mega bekerja pada

5 V sehingga diperlukan pengaturan level tegangan atau penggunaan shield yang telah disesuaikan.

arduino mega pro mini, yang berbasis ATmega2560, memiliki 54 pin digital sehingga mendukung koneksi langsung ke modul TFT paralel tanpa memerlukan ekspander tambahan. Keunggulan jumlah pin yang besar ini membuat sistem mampu menghubungkan layar grafis, sensor, serta aktuator secara bersamaan dalam satu platform [42].

Dalam konteks sistem pencampuran cat otomatis, TFT LCD 3.6 inch berperan sebagai media untuk menampilkan resep warna, nilai berat aktual dari *load cell*, status pompa, serta indikator proses mixing. Penggunaan layar grafis memberikan kejelasan informasi dibandingkan tampilan karakter 16×2 konvensional. Dengan resolusi yang lebih tinggi, pengguna dapat melihat data dalam format yang lebih informatif dan terstruktur.

Spesifikasi layar LCD TFT yang digunakan sebagai antarmuka pengguna (touchscreen) ditunjukkan pada Tabel 2.8.

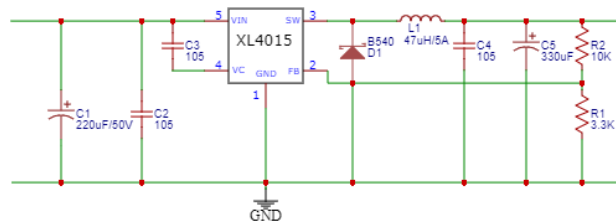
Tabel 2. 8. Spesifikasi LCD TFT

Komponen	Spesifikasi
Ukuran Layar	3.5 inch TFT
Driver IC	ST7793
Resolusi	240 × 400 pixel
Jenis Touch	Resistive Touch Panel
Kompatibilitas:	arduino UNO R3 arduino Mega 2560
Library	Adafruit_TFTLCD, Adafruit_GFX, Adafruit Touchscreen, MCUFRIEND_kbv, SPFD5408

2.4.9. Module Step-Down XL4015

Modul XL4015 merupakan konverter DC–DC tipe buck (step-down) yang digunakan untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah sesuai kebutuhan beban. Komponen ini bekerja dengan prinsip switching

frekuensi tinggi, di mana energi disimpan pada induktor dan kemudian dilepaskan ke beban melalui rangkaian filter sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan efisien [43]. Rangkaian skematik dari rangkaian penurun tegangan ini ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12. Rangkaian Skematik *Buck converter*
(Dokumentasi Peneliti)

Berdasarkan Gambar 2.12, buck converter digunakan untuk menurunkan tegangan catu daya. Modul XL4015 beroperasi pada frekuensi switching sekitar 180 kHz, dapat digunakan saat menggunakan filter berukuran lebih kecil dan dapat meningkatkan efisiensi sistem. Modul ini dapat menangani arus beban hingga sekitar 5 A dengan regulasi tegangan yang baik, sehingga cocok digunakan sebagai catu daya pada sistem elektronik dan pengisian baterai [44].

2.4.10. Power supply 10A/12V

Power supply merupakan perangkat yang berfungsi mengubah dan menyalurkan energi listrik agar sesuai dengan kebutuhan tegangan dan arus pada sebuah system atau perangkat elektronik. Dalam sistem elektronik, power supply berperan menyediakan sumber daya sehingga perangkat dapat bekerja secara optimal dan aman. power supply dapat menyuplai daya yang kontinu dan stabil dibandingkan sumber energi seperti baterai, yang cenderung mengalami penurunan tegangan dan memerlukan penggantian berkala. Bentuk fisik catu daya yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2. 13. *I/O Power Supply* [45]

Berdasarkan Gambar 2.13, power supply menyediakan sumber tegangan DC pada sistem. Power supply terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu transformator atau adaptor sebagai penurun tegangan, penyearah (rectifier) untuk mengubah arus AC menjadi DC, serta regulator tegangan untuk menjaga kestabilan keluaran. Tegangan dan arus yang stabil sangat penting untuk mencegah gangguan kinerja perangkat elektronik serta meningkatkan keandalan sistem [45].

Dalam penelitian ini digunakan power supply 12 V 10 A sebagai sumber daya utama sistem. Kapasitas arus 10 A dipilih untuk memastikan seluruh komponen seperti pompa, motor, sensor, dan modul kontrol memperoleh suplai daya yang cukup dan stabil. Tegangan 12 V digunakan karena sesuai dengan kebutuhan sebagian besar aktuator dan modul elektronik pada sistem otomasi.

2.4.11. Pilot Lamp 12VDC

Pilot lamp merupakan perangkat indikator visual yang digunakan untuk menunjukkan kondisi operasi suatu sistem kontrol atau peralatan listrik. Komponen ini bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi cahaya sehingga status sistem dapat dipantau secara langsung oleh operator. Dalam sistem kontrol industri, pilot lamp digunakan sebagai penunjuk kondisi seperti proses aktif, sistem siap, maupun keadaan gangguan. Bentuk fisik komponen indikator ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.



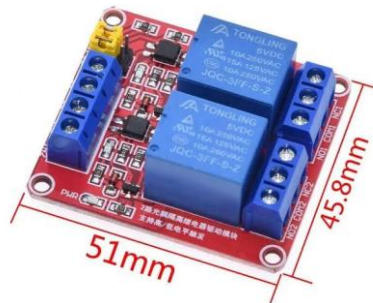
Gambar 2. 14. Pilot Lamp [46]

Berdasarkan Gambar 2.14, pilot lamp digunakan sebagai indikator kondisi sistem. Prinsip kerja pilot lamp sederhana, ketika tegangan diberikan pada terminal lampu, arus listrik mengalir melalui elemen pencahayaan sehingga lampu menyala dan menghasilkan sinyal visual. Lampu indikator dapat dihubungkan dengan rangkaian kontrol sehingga menyala atau mati sesuai kondisi logika sistem. Penggunaan indikator visual ini membantu operator memahami kondisi mesin tanpa harus membaca parameter sistem secara detail [46].

Pada sistem ini digunakan pilot lamp 12VDC berwarna merah dan hijau sebagai indikator status operasi. Lampu hijau menunjukkan kondisi sistem sudah selesai beroperasi, sedangkan lampu merah digunakan sebagai indikator sistem sedang berjalan.

2.4.12. Relay 2 Channel 12V

Relay merupakan saklar elektromekanis yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik untuk menghubungkan atau memutus rangkaian listrik. Komponen ini terdiri dari kumparan (coil), inti besi, serta kontak saklar mekanis. Ketika arus listrik mengalir pada kumparan, medan magnet terbentuk dan menarik kontak saklar sehingga terjadi perubahan kondisi dari terbuka menjadi tertutup atau sebaliknya. Modul relay dual channel menyediakan dua rangkaian relay dalam satu papan sehingga dapat mengendalikan dua beban secara independen. Setiap channel memiliki terminal kontak NO (*Normally Open*), NC (*Normally Closed*), dan COM (*Common*) yang memungkinkan berbagai konfigurasi pengendalian rangkaian Listrik[47]. Bentuk fisik modul relay yang digunakan sebagai saklar elektronik ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15. Relay 2 Channel 12V [47]

Berdasarkan Gambar 2.15, relay digunakan sebagai sakelar yang dikendalikan mikrokontroler. Dalam sistem pencampuran cairan otomatis, relay dual channel 12VDC digunakan untuk mengendalikan aktuator LED, Dengan kemampuan mengontrol beban berdaya lebih tinggi melalui sinyal kontrol berdaya rendah, relay berperan penting dalam integrasi antara mikrokontroler dan perangkat mekanis.

2.4.13. Dioda SS34

Dioda SS34 merupakan dioda tipe Schottky barrier rectifier yang digunakan untuk penyearahan tegangan dan proteksi rangkaian pada sistem elektronik. Berbeda dengan dioda silikon konvensional, dioda Schottky menggunakan sambungan logam–semikonduktor sehingga menghasilkan tegangan jatuh maju (forward voltage drop) yang lebih rendah dan waktu switching yang lebih cepat [48]. Bentuk fisik dioda Schottky yang digunakan pada rangkaian ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 16. Schottky [48]

Berdasarkan Gambar 2.16, dioda Schottky digunakan sebagai pelindung rangkaian dari arus balik. Karakteristik utama dioda SS34 meliputi kemampuan arus rata-rata hingga sekitar 3 A, tegangan reverse maksimum sekitar 40 V, serta tegangan jatuh maju berkisar 0,5–0,75 V. Nilai tegangan maju yang rendah memungkinkan efisiensi konversi daya yang lebih baik dan mengurangi rugi-rugi energi pada rangkaian. Selain itu, dioda Schottky memiliki kemampuan switching cepat dan rugi daya rendah

sehingga banyak digunakan pada rangkaian DC–DC converter, penyearah frekuensi tinggi, *freewheeling diode*, dan proteksi polaritas. Kemampuan arus surge yang tinggi juga membantu melindungi rangkaian dari lonjakan arus sesaat [datashit ss34]. Dalam sistem elektronika, dioda SS34 digunakan untuk mencegah arus balik, meningkatkan efisiensi catu daya, serta melindungi komponen dari kesalahan polaritas. Pada rangkaian catu daya dan konverter tegangan, penggunaan dioda Schottky membantu meningkatkan keestabilan sistem.

2.4.14. Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika yang berfungsi menyimpan muatan listrik sementara dalam medan listrik yang terbentuk antara dua konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Kemampuannya menyimpan energi listrik dinyatakan sebagai kapasitansi dan dipengaruhi oleh jenis bahan dielektrik yang digunakan proto[49]. Bentuk fisik kapasitor elektrolit yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17. Kapasitor *elco* [49]

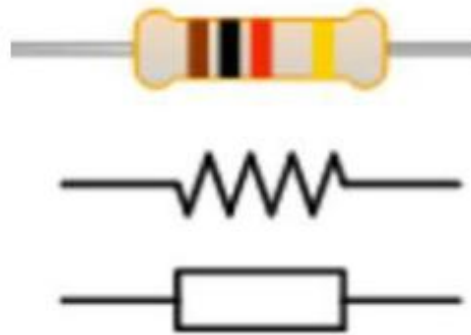
Berdasarkan Gambar 2.17, kapasitor berfungsi menjaga kestabilan tegangan pada rangkaian. Kapasitor elektrolit (ELCO) menggunakan elektrolit sebagai bahan dielektrik sehingga mampu menghasilkan nilai kapasitansi yang besar dalam ukuran fisik yang relatif kecil. Kapasitor jenis ini bersifat polar sehingga pemasangannya harus memperhatikan terminal positif dan negatif. ELCO banyak digunakan pada rangkaian catu daya untuk meredam ripple tegangan, menyaring noise, serta menjaga kestabilan tegangan keluaran [49].

Sebaliknya, kapasitor keramik menggunakan bahan keramik sebagai dielektrik yang memiliki sifat isolasi listrik dan ketahanan panas yang baik. Kapasitor ini tidak memiliki polaritas sehingga dapat dipasang pada kedua arah. Selain itu, kapasitor

keramik memiliki respon frekuensi tinggi yang baik serta stabil terhadap perubahan suhu, sehingga sering digunakan sebagai bypass capacitor dan filter gangguan frekuensi tinggi pada rangkaian elektronik.

2.4.15. Resistor

Resistor merupakan komponen elektronika pasif yang berfungsi menghambat atau membatasi aliran arus listrik dalam suatu rangkaian. Komponen ini bekerja dengan menghasilkan penurunan tegangan di antara kedua terminalnya sehingga arus yang mengalir dapat dikendalikan sesuai kebutuhan rangkaian. Nilai hambatan resistor dinyatakan dalam satuan ohm (Ω), yang menunjukkan besarnya resistansi terhadap arus listrik. Bentuk fisik komponen resistor ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2. 18. Resistor [50]

Berdasarkan Gambar 2.18, resistor digunakan untuk membatasi arus listrik. Nilai resistansi pada resistor tetap umumnya ditunjukkan melalui kode warna gelang pada badan resistor. Kombinasi warna tersebut mewakili nilai hambatan dan toleransi yang menentukan batas penyimpangan nilai resistansi. Perbedaan nilai hasil perhitungan dan pengukuran dapat terjadi karena toleransi resistor, kondisi komponen, serta ketelitian alat ukur yang digunakan [51].

2.4.16. Fuse

Fuse atau sekering merupakan perangkat proteksi listrik yang berfungsi memutus rangkaian secara otomatis ketika terjadi arus berlebih atau hubung singkat. Komponen ini bekerja dengan melelehnya elemen penghantar di dalam fuse akibat panas yang timbul ketika arus melebihi nilai nominalnya, sehingga aliran listrik terputus dan

rangkaian terlindungi dari kerusakan [52]. Bentuk fisik komponen pengaman arus ini ditunjukkan pada Gambar 2.19.

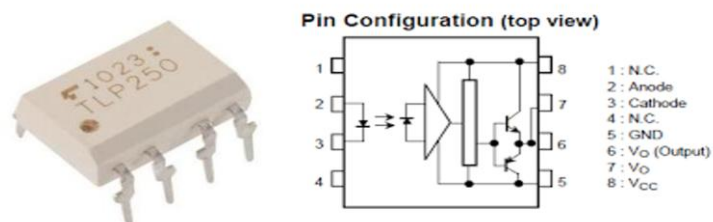


Gambar 2. 19. *Fuse* [53]

Berdasarkan Gambar 2.19, fuse berfungsi melindungi rangkaian dari arus berlebih. Fuse digunakan untuk melindungi peralatan listrik dan elektronik dari gangguan arus lebih, menjaga keandalan sistem, serta mencegah kerusakan komponen akibat kondisi abnormal. Pemilihan rating arus fuse harus disesuaikan dengan arus kerja normal agar fuse tetap aman saat operasi normal namun mampu memutus rangkaian dengan cepat saat terjadi gangguan.

2.4.17. Optocoupler TLP250

Optocoupler TLP250 merupakan salah satu komponen elektronika yang digunakan sebagai penghubung sinyal sekaligus isolator antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya. Komponen ini bekerja dengan prinsip konversi sinyal listrik menjadi cahaya dan kemudian dikembalikan lagi menjadi sinyal listrik pada sisi keluaran, sehingga tidak terjadi hubungan listrik secara langsung antara kedua rangkaian. TLP250 secara khusus dirancang sebagai driver untuk MOSFET, sehingga mampu mengubah sinyal PWM yang dihasilkan oleh mikrokontroler menjadi sinyal pulsa dengan tegangan yang lebih tinggi[54]. Bentuk fisik dan skematik dari IC opto-isolator ini ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20. Gambar dan Skematik TLP250[54]

Berdasarkan Gambar 2.20, optocoupler TLP250 digunakan sebagai isolator antara rangkaian kontrol dan daya. Selain itu, penggunaan TLP250 juga memberikan

keuntungan berupa isolasi listrik antara sisi kontrol dan sisi beban. Hal ini sangat penting terutama pada sistem yang melibatkan beban induktif atau switching tegangan tinggi, karena dapat melindungi mikrokontroler dari gangguan seperti noise maupun lonjakan tegangan.

2.5. Pengukuran Tegangan

2.5.1. Error Pengukuran

Pengukuran tegangan merupakan proses untuk mengetahui besar tegangan pada suatu titik rangkaian. Pada sistem elektronika, pengukuran tegangan dilakukan untuk memastikan bahwa komponen memperoleh suplai sesuai dengan kebutuhan kerjanya. Tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan komponen tidak bekerja stabil, sedangkan tegangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada komponen.

Pada sistem pencampuran cat otomatis, pengukuran tegangan dilakukan pada beberapa bagian, seperti power supply 12 VDC, step down 5 VDC, input driver, gate source MOSFET, output pompa, relay, dan lampu indikator. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital pada mode DC Volt. Probe merah digunakan untuk mengukur titik positif, sedangkan probe hitam dihubungkan ke ground atau terminal negatif rangkaian. Hasil pengukuran tegangan tidak selalu sama persis dengan nilai standar atau nilai teori. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti kondisi catu daya, tahanan kabel, sambungan rangkaian, beban yang aktif, serta karakteristik alat ukur yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan error untuk mengetahui seberapa besar selisih antara nilai acuan dengan nilai hasil pengukuran.

Berdasarkan penelitian Putra dkk. pada pengujian sensor tegangan DC, hasil pengukuran dapat dianalisis dengan menghitung nilai selisih, error, dan akurasi. Perhitungan tersebut digunakan untuk mengetahui tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai pembanding. Pada penelitian ini, konsep tersebut digunakan untuk membandingkan tegangan standar dengan tegangan hasil pengukuran pada sistem elektrikal alat.

Persentase error pengukuran tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{V_s - V_u}{V_s} \right| \times 100\% \quad (2.12)$$

Keterangan:

V_s = tegangan standar atau tegangan acuan

V_u = tegangan hasil pengukuran

Tanda mutlak digunakan agar nilai error tetap bernilai positif, baik tegangan hasil pengukuran lebih besar maupun lebih kecil dari nilai standar. Semakin kecil nilai error, maka semakin dekat hasil pengukuran terhadap nilai acuan. Sebaliknya, semakin besar nilai error, maka semakin besar penyimpangan tegangan yang terjadi pada rangkaian. Selain error, tingkat akurasi juga dapat dihitung untuk mengetahui persentase kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai acuan.

Persamaan error ini digunakan pada pengujian tegangan elektrik untuk mengetahui apakah tegangan pada setiap titik pengukuran masih sesuai dengan kebutuhan kerja komponen. Dengan adanya perhitungan tersebut, hasil pengukuran tidak hanya ditampilkan dalam bentuk nilai tegangan, tetapi juga dapat dianalisis secara kuantitatif [55].

Selain menggunakan perhitungan error, hasil pengukuran tegangan juga dibandingkan dengan rentang tegangan kerja yang masih dapat diterima. Pada penelitian ini, rentang regulasi tegangan DC dari dokumen teknis power supply ATX digunakan sebagai acuan pembanding praktis. Acuan ini tidak menunjukkan bahwa power supply yang digunakan pada alat merupakan power supply ATX atau merek tertentu, tetapi digunakan sebagai referensi teknis untuk menilai apakah tegangan 5 VDC dan 12 VDC masih berada pada rentang kerja yang wajar.

Berdasarkan acuan tersebut, tegangan 5 VDC dinyatakan masih sesuai apabila berada pada rentang 4,75 V sampai 5,25 V. Sementara itu, tegangan 12 VDC dinyatakan masih sesuai apabila berada pada rentang 11,20 V sampai 12,60 V. Rentang tersebut digunakan sebagai pembanding dalam analisis hasil pengujian karena sistem

pencampuran cat otomatis menggunakan jalur tegangan 5 VDC untuk bagian kontrol dan jalur tegangan 12 VDC untuk beban utama [56].