

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Setelah dilakukan peninjauan, diperoleh beberapa penelitian yang berhubungan dan sudah dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian tersebut beserta keterangannya ditunjukkan pada **Tabel 2.1** berikut.

Tabel 2. 1. Tinjauan Pustaka

No.	Judul Penelitian	Keterangan	Penelitian Ini
1.	Dispenser Bubuk Jamu Otomatis Berdasarkan Keluhan Kesehatan Menggunakan Arduino. (Thahira, 2021)	Jamu bubuk perlu diperhatikan takaran, suhu dan disesuaikan dengan keluhan yang dialami pengguna. Untuk mempertahankan khasiat dari jamu yang dianjurkan sesuai dengan keluhan pengguna, Thahira merancang Dispenser Bubuk Jamu Otomatis. Digunakan Arduino sebagai <i>main control unit</i> , dan solenoid sebagai aktuator buka tutup katup[7].	Sistem dispenser bubuk yang diterapkan belum terdapat sensor yang memvalidasi banyaknya bahan bubuk yang dikeluarkan aktuator. Dapat diterapkan sensor loadcell sebagai umpan balik untuk memvalidasi nilai berat yang dikeluarkan aktuator sekaligus acuan aktuator untuk berhenti mengeluarkan bubuk.
2.	Rancang Bangun Alat Penakar Gula Pasir dan Bubuk Kopi Berbasis Arduino (Mariam dkk. 2024)	Untuk meningkatkan efektivitas penakaran gula atau kopi, Mariam dkk. merancang Alat Penakar Gula Pasir dan Bubuk Kopi berbasis Arduino. Pada penelitiannya digunakan sensor infrared yang	Servo digunakan sebagai aktuator dispenser bubuk kopi dan gula pada alat yang dirancang. Yang mana hanya menggunakan kondisi terbuka dan tertutup saja sebagai

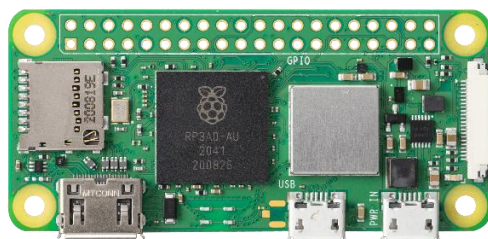
		mendeteksi adanya wadah dan motor servo dengan otomatis berhenti jika terisi sesuai yang diinginkan[8].	aktuasinya. Dapat diterapkan motor DC dan <i>screw feeder</i> sebagai aktuasi pengeluaran bahan bubuk. Sehingga diperoleh pengaturan pengeluaran bahan baku yang fleksibel.
3.	Analisis Pengaruh Massa Jenis Bumbu Masakan Pada Alat Penakar Bumbu Dapur Otomatis Berbasis Arduino.(Christie dkk. 2022)	Alat penakar bumbu dapur otomatis.dirancang dengan berbasis Arduino Mega 2560 untuk mampu melakukan standardisasi keluaran bumbu. Keypad dan LCD i2C digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk memasukkan jenis bahan dan berat yang diinginkan[9].	Digunakan keypad <i>membrane</i> dan LCD i2c sebagai antarmuka pengguna. Dapat diterapkan LCD TFT dengan GUI (<i>Graphical User Interface</i>) yang interaktif Dengan menggunakan python GUI pada Raspberry Zero 2W dan LCD TFT 3.5 inch.
4.	Optimalisasi Sistem Penakar Bahan Baku Roti Otomatis Menggunakan Kontrol PID (Humaira dkk. 2024)	Untuk membantu penakaran bahan baku roti menjadi lebih mudah dan akurat, dibuatlah sistem yang dapat menakar bahan baku roti secara otomatis menggunakan metode kontrol PID dengan memanfaatkan Arduino Uno sebagai pengontrol gerak motor DC dan sensor	Digunakan Arduino sebagai pusat kendali dari seluruh komponen yang digunakan. Arduino UNO mengeksekusi perintah aktuator, pembacaan sensor, pembacaan input, serta kalkulasi <i>Propotional Integral</i> . Dapat diterapkan

		load cell sebagai feedback dari kontrol PID[5].	mikrokontroler berbasis ARM dengan FreeRTOS bawaan untuk melakukan banyak tugas dan perhitungan kompleks.
--	--	---	---

Penelitian tugas akhir ini akan menggunakan Raspberry Pi Zero 2W sebagai program antarmuka pengguna, STM32411CEU6 sebagai kontroler dalam menerima data dari Raspberry Pi untuk mengeksekusi aktuator dan sensor, motor stepper sebagai aktuator penggerak tabung(*rotary*), motor DC sebagai aktuator pengeluaran bahan baku bubuk, serta loadcell sebagai pembaca nilai berat secara *realtime*. Diterapkan pula metode *Propotional Integral* sebagai pengendalian motor DC pengeluaran bahan baku bubuk berdasarkan respon dari nilai berat yang terbaca.

2.2. Raspberry Pi Zero 2W

Raspberry Pi Zero 2 W merupakan *single board computer* (SBC) berdaya rendah yang dikembangkan oleh Raspberry Pi Foundation sebagai pengembangan dari Raspberry Pi Zero W dengan peningkatan signifikan pada kemampuan pemrosesan. Perangkat ini menggunakan *System-on-Chip* (SoC) BCM2710A1 yang mengintegrasikan prosesor ARM Cortex-A53 quad-core 64-bit, sehingga memiliki performa hingga lima kali lebih cepat dibandingkan generasi sebelumnya. Dengan arsitektur tersebut, Raspberry Pi Zero 2 W mampu menjalankan sistem operasi berbasis Linux dan mendukung berbagai bahasa pemrograman tingkat tinggi, khususnya Python, yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem tertanam modern[10].



Gambar 2. 1 Board Raspberry Pi Zero 2W

Gambar 2.1 merupakan bentuk fisik dari Raspberry Pi Zero 2W. Sebagai sebuah SBC, Raspberry Pi Zero 2 W tidak hanya berfungsi sebagai pengendali perangkat keras, tetapi juga sebagai komputer mini yang mampu menjalankan antarmuka grafis (*graphical user interface*). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa Raspberry Pi banyak dimanfaatkan dalam sistem otomasi, kendali industri, dan prototipe penelitian karena kemampuannya menjalankan aplikasi berbasis Python dengan lingkungan pemrograman yang fleksibel dan kaya pustaka[11]. Python memungkinkan pengembang untuk membangun logika kontrol, pengolahan data, serta antarmuka pengguna secara terintegrasi dalam satu platform, sesuatu yang sulit dicapai pada mikrokontroler konvensional.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Raspberry Pi Zero 2W

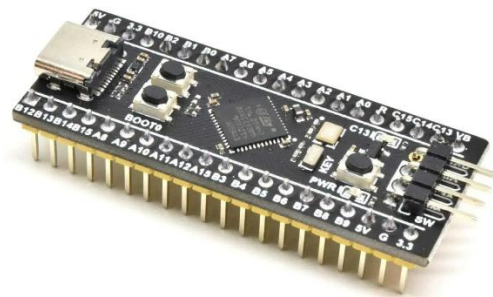
Spesifikasi Raspberry Pi Zero 2W	
SoC	Broadcom BCM2710A1
CPU	Quad-core ARM Cortex-A53 64-bit
Frekuensi CPU	1.0 GHz
RAM	512 MB LPDDR2
Sistem Operasi	Linux (Raspberry Pi OS dan turunannya)
Bahasa Pemrograman	Python, C/C++, Java, dll.
Konektivitas	Wi-Fi 2.4 GHz 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2
Antarmuka Display	Mini HDMI, SPI (TFT LCD)
Port USB	2 × Micro USB (<i>Power</i> dan OTG)
GPIO	40 pin <i>header</i>
Dimensi	65 mm × 30 mm

Berdasarkan spesifikasi pada **Tabel 2.2**, Raspberry Pi Zero 2 W memiliki sumber daya komputasi yang memadai untuk menjalankan sistem operasi Linux beserta *desktop environment* ringan maupun aplikasi *graphical user interface* (GUI) berbasis Python. Dukungan RAM sebesar 512 MB dan prosesor quad-core memungkinkan eksekusi aplikasi GUI seperti Tkinter, PyQt, atau Kivy secara stabil, termasuk pada layar berukuran kecil seperti TFT atau touchscreen 3.5 inci. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa Raspberry Pi banyak digunakan sebagai platform pengembangan antarmuka grafis pada sistem tertanam karena kemampuannya menjalankan aplikasi Python dengan pustaka GUI tanpa memerlukan perangkat tambahan[10], [12].

Beberapa studi menyebutkan bahwa penggunaan Raspberry Pi dalam sistem tertanam memungkinkan pengembangan antarmuka yang menyerupai aplikasi komputer, sehingga meningkatkan pengalaman pengguna dan kemudahan pengoperasian sistem [12]. Untuk penerapan dalam sistem penakaran dan dispenser otomatis, kemampuan ini sangat penting karena memungkinkan integrasi tampilan takaran, status sistem, pengaturan parameter, serta monitoring proses secara visual dan intuitif. Dengan demikian, Raspberry Pi Zero 2 W menjadi platform yang sesuai untuk berperan sebagai *high-level controller* atau antarmuka utama, terutama pada sistem yang membutuhkan visualisasi data dan fleksibilitas pemrograman yang tinggi.

2.3. STM32F411CEU6

STM32F411CEU6 merupakan mikrokontroler berbasis arsitektur ARM Cortex-M4 yang dikembangkan oleh STMicroelectronics untuk aplikasi sistem tertanam yang membutuhkan kinerja komputasi tinggi dan kemampuan *real-time*. Mikrokontroler ini termasuk dalam keluarga STM32F4 yang dirancang untuk menggabungkan performa prosesor 32-bit dengan efisiensi daya serta kelengkapan periferal untuk aplikasi kontrol, otomasi, dan pemrosesan sinyal[13]. Berbeda dengan mikrokontroler berbasis AVR seperti ATmega yang menggunakan arsitektur 8-bit, STM32F411CEU6 memiliki kemampuan pemrosesan data yang lebih cepat dan efisien berkat arsitektur 32-bit serta dukungan instruksi tingkat lanjut.



Gambar 2. 2 Board STM32F411CEU6

Gambar 2.2 merupakan bentuk fisik dari STM32F411CEU6. MCU ini menggunakan prosesor ARM Cortex-M4 dengan frekuensi hingga 100 MHz dan telah dilengkapi dengan *Floating Point Unit* (FPU) berbasis perangkat keras. Keberadaan FPU memungkinkan mikrokontroler ini melakukan operasi aritmatika

pecahan dan perhitungan matematis kompleks, seperti perhitungan kontrol *Proportional*, filter digital, dan pemrosesan data sensor, secara signifikan lebih cepat dibandingkan mikrokontroler AVR yang umumnya tidak memiliki FPU dan masih mengandalkan operasi *fixed-point*. Penelitian yang membandingkan performa mikrokontroler 8-bit dan 32-bit menunjukkan bahwa arsitektur ARM Cortex-M mampu menyelesaikan operasi matematis kompleks dengan latensi lebih rendah dan efisiensi siklus instruksi yang lebih baik[13].

Tabel 2. 3 Spesifikasi STM32F411CEU6

Spesifikasi STM32F411CEU6	
Produsen	STMicroelectronics
Arsitektur	ARM Cortex-M4
Lebar Data	32-bit
Frekuensi Maksimum	Hingga 100 MHz
Floating Point Unit	Ada (Single Precision FPU)
Flash Memory	512 KB
SRAM	128 KB
Sistem Operasi	Mendukung FreeRTOS (native via STM32Cube)
Timer	Advanced, General Purpose, PWM
Antarmuka Komunikasi	USART, SPI, I2C, USB
ADC	12-bit
Tegangan Operasi	1.7 – 3.6 V
Package	UFQFPN48 (CEU6)

Berdasarkan spesifikasi pada **Tabel 2.3**, STM32F411CEU6 memiliki kompatibilitas yang sangat baik untuk menjalankan sistem operasi real-time secara *native*, khususnya FreeRTOS, tanpa memerlukan modifikasi arsitektur perangkat keras tambahan. Integrasi FreeRTOS yang disediakan secara resmi oleh STMicroelectronics melalui STM32Cube memungkinkan pengembang untuk membagi sistem ke dalam banyak *task* yang berjalan secara paralel dan terjadwal dengan deterministik. Setiap *task* dapat diberikan prioritas dan periode eksekusi yang berbeda, sehingga proses seperti pembacaan sensor, kendali motor, komunikasi data, dan pengolahan sinyal dapat berjalan secara independen dan terkoordinasi[13]. Mekanisme sinkronisasi seperti *mutex*, *binary semaphore*, dan *queue* yang tersedia pada FreeRTOS memungkinkan pengelolaan sumber daya

bersama secara aman, sehingga risiko terjadinya *race condition* dapat diminimalkan secara signifikan dibandingkan sistem yang hanya mengandalkan eksekusi sekuensial dalam satu *main loop*.

Selain keunggulan pada manajemen multitasking, STM32F411CEU6 juga unggul dalam kecepatan pemrosesan operasi perhitungan. Prosesor ARM Cortex-M4 yang digunakan telah dilengkapi *hardware Floating Point Unit (FPU)*, yang memungkinkan operasi aritmatika bilangan pecahan dan perhitungan matematis kompleks dieksekusi secara langsung oleh perangkat keras. Studi menunjukkan bahwa penggunaan FPU pada Cortex-M4 mampu mempercepat eksekusi algoritma kontrol, seperti kontrol PID dan filter digital, hingga beberapa kali lipat dibandingkan mikrokontroler 8-bit yang harus mengeksekusi operasi serupa menggunakan *software emulation*. Dengan frekuensi kerja hingga 100 MHz dan arsitektur 32-bit, STM32F411CEU6 mampu memproses data sensor dan melakukan perhitungan kontrol secara cepat dan stabil, bahkan ketika dijalankan bersamaan dengan beberapa *task* lain di bawah kendali RTOS.

2.4. LCD TFT

Liquid Crystal Display (LCD) berbasis *Thin Film Transistor (TFT)* merupakan teknologi display aktif yang menggunakan transistor film tipis pada setiap piksel untuk meningkatkan kecepatan *switching*, kontras, serta reproduksi warna dibandingkan teknologi *passive matrix*[14]. Arsitektur TFT memungkinkan kontrol individual terhadap tiap piksel sehingga menghasilkan refresh rate yang lebih tinggi dan respon visual yang lebih stabil, yang sangat penting dalam aplikasi *embedded system* berbasis *graphical user interface (GUI)*[15]. Selain itu, penggunaan antarmuka digital seperti HDMI pada modul TFT modern memungkinkan transmisi sinyal video berkecepatan tinggi dengan kualitas visual yang lebih baik dibandingkan antarmuka paralel atau SPI konvensional[16].



Gambar 2. 3 MPI3508 3.5inch TFT LCD antarmuka HDMI

Gambar 2.3 merupakan bentuk fisik dari LCD TFT MPI3508 Pada penelitian ini digunakan LCD TFT tipe MPI3508 3.5” HDMI LCD yang memiliki konektivitas HDMI sebagai jalur utama komunikasi video dengan Raspberry Pi Zero 2 W. Pemilihan antarmuka HDMI didasarkan pada kebutuhan sistem untuk menampilkan nilai berat secara real-time selama proses penakaran berlangsung. Sistem akuisisi massa menggunakan load cell dan ADC akan menghasilkan pembaruan data secara kontinu, sehingga diperlukan tampilan dengan refresh rate tinggi dan latensi rendah agar perubahan nilai berat dapat diamati secara responsif oleh pengguna. Dibandingkan LCD berbasis SPI yang memiliki keterbatasan bandwidth data, HDMI menyediakan bandwidth video yang jauh lebih besar sehingga mendukung tampilan grafis dinamis tanpa flicker maupun tearing[16].

Tabel 2. 4 Spesifikasi MPI3508 HDMI TFT

Spesifikasi MPI3508 LCD TFT HDMI	
Ukuran Layar	3.5 inch
Tipe Panel	TFT LCD (Active Matrix)
Resolusi	480 × 320 pixel
Antarmuka Video	HDMI, SPI
Tegangan Operasi	5 V DC
Metode Input	HDMI Digital Video Signal
Kompatibilitas	Raspberry Pi Series
Refresh Rate	hingga 60 Hz

Berdasarkan spesifikasi pada **Tabel 2.4**, penggunaan panel TFT active matrix dengan resolusi 480×320 pixel dan antarmuka HDMI sangat sesuai untuk aplikasi

sistem takar otomatis. Resolusi tersebut cukup untuk menampilkan informasi numerik berat, status sistem, serta indikator proses secara simultan tanpa terjadi keterbatasan ruang visual. Selain itu, dukungan refresh rate hingga 60 Hz melalui HDMI memungkinkan pembaruan nilai berat secara kontinu dengan respons visual yang halus, sehingga pengguna dapat memantau dinamika perubahan massa secara real-time selama proses dispensi berlangsung. Karakteristik ini mendukung kebutuhan sistem yang menuntut interaksi manusia–mesin (HMI) yang responsif dan stabil dalam lingkungan embedded berbasis single board computer.

2.5. Motor DC dengan Encoder

Motor DC merupakan aktuator elektromekanik yang banyak digunakan dalam sistem kendali tertanam karena memiliki karakteristik torsi yang proporsional terhadap arus jangkar serta kemudahan pengaturan kecepatan melalui variasi tegangan atau teknik PWM[17]. Pada sistem kendali tertutup, motor DC sering dikombinasikan dengan encoder untuk menyediakan umpan balik kecepatan maupun posisi secara presisi, sehingga memungkinkan implementasi pengendali berbasis PID untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas sistem[18]. Encoder magnetik incremental bekerja dengan mendeteksi perubahan medan magnet pada rotor untuk menghasilkan pulsa digital yang sebanding dengan kecepatan putaran poros[19].



Gambar 2. 4 Motor DC dengan Encoder N20

Gambar 2.4 merupakan bentuk fisik motor DC dengan Encoder. Dalam penelitian ini digunakan motor DC tipe JGA12-N20 dengan gearbox rasio 100:1 dan encoder magnetik CH-N20-3, yang diaplikasikan pada mekanisme screw

feeder untuk sistem penakaran bumbu otomatis. Pada sistem penakaran berbasis ulir, kecepatan dan jumlah putaran motor secara langsung menentukan laju aliran material granular yang keluar dari tabung penyimpanan. Oleh karena itu, penggunaan motor dengan encoder memungkinkan pengukuran jumlah rotasi secara presisi sehingga massa material yang dikeluarkan dapat dikontrol secara kuantitatif melalui sistem kendali tertutup berbasis PID. Pendekatan ini akan digunakan pada sistem dispensing material untuk meningkatkan akurasi dan repeatability penakaran.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Motor DC JGA12-N20

Spesifikasi JGA12-N20 Motor DC <i>with</i> Encoder	
Tipe Motor	DC Gear Motor JGA12-N20
Rasio Gearbox	100:1
Rated Speed	± 90 RPM
Rated Current	170 mA
Rated Torque	0.7 kg·cm
Stall Torque	1.5 kg·cm
Tegangan Operasi Encoder	3 – 6 V DC
Frekuensi Maksimum Encoder	100 kHz

Berdasarkan spesifikasi pada **Tabel 2.5**, rasio reduksi 100:1 menghasilkan peningkatan torsi yang signifikan dibandingkan motor tanpa gearbox, sehingga sesuai untuk menggerakkan mekanisme *screw feeder* yang memerlukan gaya dorong terhadap material. Rated torque sebesar 0.7 kg·cm serta stall torque 1.5 kg·cm memberikan margin torsi yang cukup untuk menghindari kehilangan langkah akibat beban material. Encoder magnetik dengan frekuensi hingga 100 kHz memungkinkan pembacaan pulsa beresolusi tinggi sehingga perubahan kecepatan dapat dideteksi secara cepat dan stabil. Kombinasi karakteristik torsi dan umpan balik presisi ini sangat mendukung implementasi pengendali PI pada sistem penakaran otomatis untuk memperoleh respon cepat dan error steady-state yang kecil.

Kecepatan putar keluaran mekanisme transmisi roda gigi ditentukan oleh rasio jumlah gigi antara roda gigi penggerak dan roda gigi yang digerakkan. Hubungan tersebut dinyatakan sebagai,

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.1)$$

dengan i merupakan rasio transmisi roda gigi, Z_1 adalah jumlah gigi roda gigi penggerak (*driving gear*), dan Z_2 adalah jumlah gigi roda gigi yang digerakkan (*driven gear*). Berdasarkan rasio tersebut, kecepatan putar poros keluaran dapat dihitung menggunakan persamaan,

$$n_{out} = n_{in} \times \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2.2)$$

dengan n_{in} merupakan kecepatan putar poros penggerak dan n_{out} merupakan kecepatan putar poros yang digerakkan.

Pada sistem yang menggunakan motor DC berencoder, jumlah pulsa encoder yang dihasilkan pada poros keluaran dipengaruhi oleh resolusi encoder, rasio reduksi *gearbox*, serta rasio transmisi roda gigi. Apabila encoder dibaca menggunakan metode *quadrature decoding* ($\times 4$), maka resolusi efektif encoder dapat dihitung menggunakan persamaan,

$$PPR_{efektif} = PPR \times 4 \quad (2.3)$$

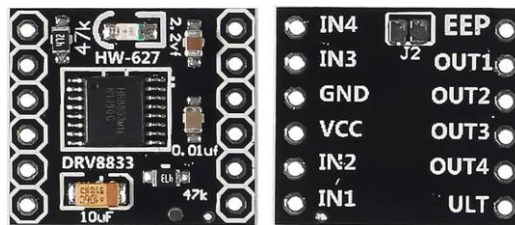
dengan PPR merupakan resolusi dasar encoder (*pulse per revolution*). Selanjutnya jumlah pulsa yang dihasilkan pada satu putaran poros keluaran dinyatakan sebagai,

$$N_{pulse} = PPR_{efektif} \times G \times i \quad (2.4)$$

dengan N_{pulse} adalah jumlah pulsa encoder pada satu putaran poros keluaran, G merupakan rasio reduksi *gearbox*, dan i merupakan rasio transmisi roda gigi. Persamaan-persamaan tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kecepatan putar mekanisme *screw feeder* serta jumlah pulsa encoder yang menjadi umpan balik pada sistem kendali yang dirancang.

2.6. Driver Motor DRV8833

Driver motor DC merupakan rangkaian penguat daya yang digunakan untuk mengendalikan arah dan kecepatan motor melalui konfigurasi H-bridge. DRV8833 adalah dual H-bridge motor *driver* berbasis MOSFET yang dirancang untuk aplikasi tegangan rendah dengan efisiensi *switching*. Berdasarkan datasheet resmi Texas Instruments, DRV8833 mampu beroperasi pada tegangan suplai 2,7 V hingga 10,8 V dengan arus kontinu hingga $\pm 1,5$ A per *channel*, serta mendukung kontrol PWM langsung dari mikrokontroler[20]. Penggunaan topologi H-bridge berbasis MOSFET dalam sistem kendali motor terbukti memberikan efisiensi daya yang lebih baik dibandingkan transistor bipolar serta memungkinkan pengaturan arah putaran secara digital[21].



Gambar 2. 5 Module DRV 8833 Motor Driver

Gambar 2.5 merupakan bentuk fisik dari *driver* motor 8833. Secara prinsip kerja, DRV8833 terdiri dari empat MOSFET internal yang membentuk satu full H-bridge untuk setiap kanal. Kombinasi logika pada pin IN1 dan IN2 menentukan mode operasi motor, yaitu forward, reverse, brake, dan coast. Ketika sinyal PWM diberikan pada salah satu pin input, tegangan rata-rata yang diterima motor menjadi fungsi dari duty cycle, sehingga kecepatan dapat dikontrol secara proporsional.

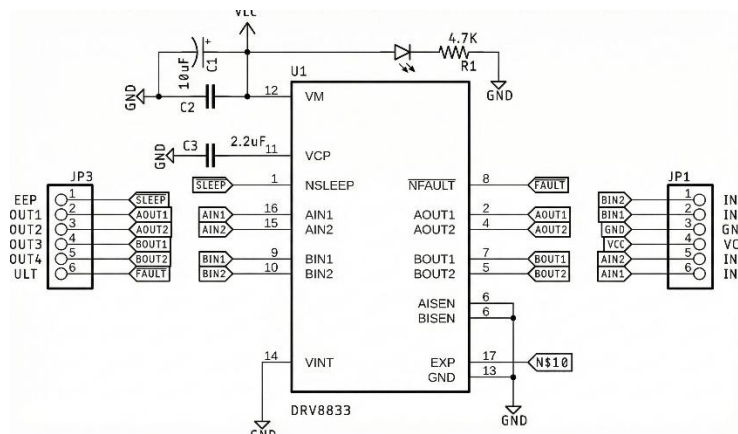
Tabel 2. 6 Spesifikasi Modul DRV8833

Spesifikasi DRV8833 <i>Dual Channel H-Bridge Motor Driver</i>	
Tegangan suplai motor (VM)	2,7 – 10,8 V
Arus kontinu per kanal	1,5 A
Arus puncak	2 A (non-continuous)
Jumlah kanal	2 H-bridge
Tipe switching	MOSFET internal
Proteksi	Overcurrent, thermal shutdown, undervoltage lockout
Tegangan logika	2 – 7 V
Frekuensi PWM maksimum	> 100 kHz

Pada sistem *screw feeder* yang dirancang, sumber daya berasal dari PSU 12 V 5 A yang diturunkan menjadi 6 V menggunakan modul LM2596 sebelum diberikan ke pin VM DRV8833. Tegangan 6 V dipilih sesuai dengan spesifikasi maksimum motor JGA12-N20 sehingga menjaga keandalan sistem dan mencegah overvoltage. Sinyal kontrol PWM berasal dari mikrokontroler dan digunakan untuk mengatur laju putaran screw agar presisi penakaran tetap terjaga. Hubungan antara duty cycle PWM dan tegangan rata-rata motor dinyatakan sebagai,

$$V_{avg} = D \cdot V_s \quad (2.5)$$

di mana, V_{avg} adalah tegangan rata-rata (*average output voltage*) yang diterima oleh motor DC setelah proses pensaklaran PWM. Tegangan ini bukan tegangan DC murni, melainkan nilai rata-rata dari sinyal pulsa yang diswitch secara periodik. Variabel D adalah *duty cycle*, yaitu perbandingan antara waktu aktif (ON) terhadap satu periode sinyal PWM, dengan nilai antara 0 hingga 1 (atau 0–100%). Sedangkan V_s merupakan tegangan suplai yang diberikan ke motor melalui driver DRV8833.



Gambar 2. 6 Skematik Rangkaian Modul DRV8833

Berdasarkan **Gambar 2.6** modul DRV8833 yang digunakan, tegangan suplai motor (VM) diberikan melalui pin 12 dan distabilisasi oleh kapasitor elektrolit 10 μ F (C1) serta kapasitor bypass tambahan (C2) terhadap ground untuk meredam ripple akibat switching PWM. Pin VCP terhubung dengan kapasitor 2,2 μ F (C3) sebagai bagian dari charge pump internal yang menggerakkan MOSFET sisi high

pada konfigurasi H-bridge. Pin nSLEEP dapat dikontrol melalui header JP3 untuk mengaktifkan atau menonaktifkan driver, sedangkan sinyal kendali arah dan PWM diberikan melalui pin AIN1–AIN2 dan BIN1–BIN2 yang diakses lewat header JP1. Keluaran H-bridge tersedia pada pin AOUT1–AOUT2 dan BOUT1–BOUT2 untuk menggerakkan dua motor DC secara independen. Pin nFAULT menyediakan sinyal indikasi kesalahan ketika terjadi overcurrent atau thermal shutdown, sementara pin AISEN dan BISEN terhubung ke ground sebagai referensi pembatas arus internal.

2.7. Stepper Motor

Motor stepper merupakan aktuator elektromekanik yang mengubah pulsa digital menjadi perpindahan sudut diskrit sehingga memungkinkan pengendalian posisi secara presisi. Berdasarkan penelitian mengenai karakteristik motor stepper hibrida, motor tipe ini memiliki akurasi sudut yang tinggi, kemampuan holding torque yang baik pada kecepatan rendah, serta sangat sesuai untuk aplikasi positioning seperti CNC dan sistem otomasi industri[22]. Motor stepper bekerja dengan mengenergikan kumparan stator secara bergantian sehingga menghasilkan medan magnet yang menarik rotor ke posisi sudut tertentu sesuai jumlah pulsa yang diberikan[23].



Gambar 2. 7 Motor Stepper NEMA 17

Gambar 2.7 merupakan tampilan fisik dari motor stepper nema 17. Yang mana merupakan Motor yang digunakan pada sistem *selector chamber* adalah tipe NEMA 17 seri 17HS3401 dengan sudut langkah $1,8^\circ$ per step (200 langkah per

putaran). Tipe ini termasuk kategori hybrid stepper motor yang menggabungkan karakteristik permanent magnet dan variable reluctance untuk meningkatkan resolusi sudut dan torsi. Spesifikasi Stepper Motor NEMA17 ditunjukkan pada **Tabel 2.7** berikut,

Tabel 2. 7 Spesifikasi Stepper Motor NEMA17

Spesifikasi Stepper Motor Nema 17 17HS3401	
Model	17HS3401
Frame Size	NEMA 17 (42 × 42 mm)
Step Angle	1.8°
Arus per fase	1.3 A
Tegangan nominal	12 V
Holding Torque	28 N·cm (≈ 2.8 kg·cm)
Diameter poros	5 mm

Pada sistem ini, motor stepper akan digunakan untuk mengatur posisi *selector chamber* secara presisi berdasarkan jumlah langkah yang dikirimkan dari mikrokontroler melalui driver A4988. Berbeda dengan motor DC pada screw feeder yang dikontrol berbasis kecepatan, motor stepper pada selector chamber dikontrol berbasis posisi absolut dengan menghitung jumlah pulsa step yang diberikan. Hal ini memungkinkan pemilihan ruang material secara deterministik tanpa memerlukan sensor posisi tambahan. Hubungan antara jumlah langkah dan sudut rotasi dinyatakan sebagai,

$$\theta = N \times \theta_s \quad (2. 6)$$

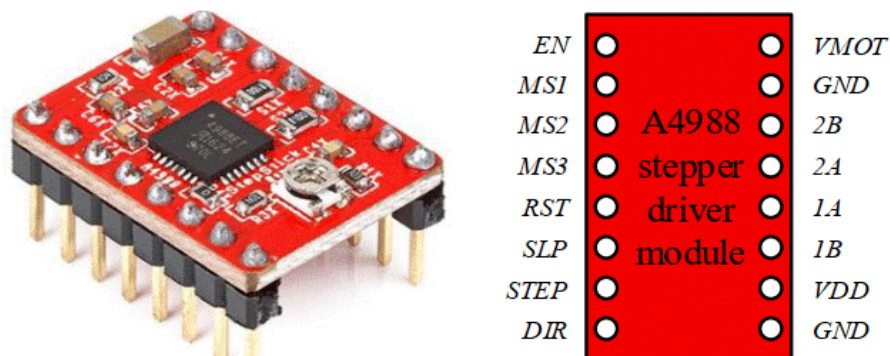
Hubungan antara jumlah pulsa yang diberikan dan sudut rotasi motor stepper dapat dinyatakan bahwa sudut rotasi total θ diperoleh dari hasil perkalian antara jumlah pulsa langkah N dengan sudut per langkah θ_s . Dengan demikian, apabila motor memiliki sudut per langkah sebesar 1,8°, maka setiap satu pulsa yang diberikan akan menghasilkan perpindahan sudut sebesar 1,8°, sehingga semakin banyak pulsa yang dikirimkan, semakin besar sudut rotasi total yang dihasilkan secara proporsional. Jika menggunakan microstepping dengan faktor pembagi m , maka resolusi sudut menjadi,

$$\theta_{micro} = \frac{\theta_s}{m} \quad (2.7)$$

Dengan spesifikasi holding torque sebesar 28 N·cm, motor NEMA 17 ini memadai untuk menggerakkan mekanisme selector chamber yang membutuhkan presisi sudut serta kemampuan mempertahankan posisi saat tidak bergerak.

2.8. Driver Motor Stepper A4988

Modul driver stepper motor berfungsi sebagai antarmuka antara sistem kendali digital (*microcontroller*) dan aktuator stepper motor. Pada sistem ini digunakan IC A4988 yang merupakan driver bipolar stepper dengan fitur pengaturan arus berbasis *chopper current control*. Berdasarkan datasheet resmi dari Allegro MicroSystems, A4988 mendukung kendali *step* dan *direction*, serta menyediakan mode *microstepping* hingga 1/16 step untuk meningkatkan resolusi gerak dan mengurangi getaran mekanik pada sistem aktuasi[24]. Fitur internal current limiting memungkinkan pengendalian arus fase motor secara presisi melalui resistor sense (Rsense), sehingga arus maksimum motor dapat disesuaikan dengan karakteristik nominal motor stepper yang digunakan. Bentuk fisik dari



Gambar 2. 8 Modul A4899 Motor Stepper Driver dan *Pin-Out* Diagramnya

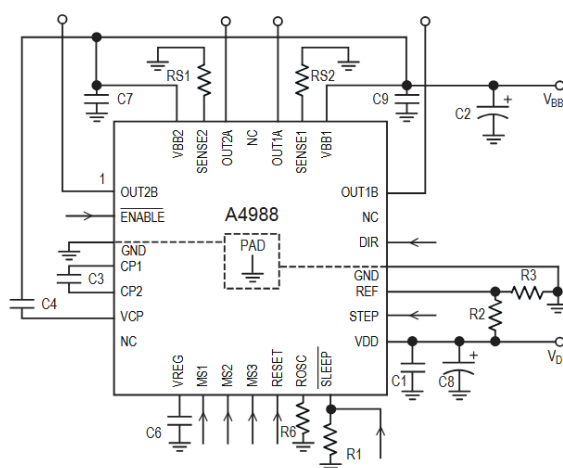
Secara operasional, A4988 bekerja dengan metode fixed off-time current regulation, di mana arus kumparan dipertahankan pada nilai referensi tertentu menggunakan teknik PWM chopping. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi sistem dan mencegah overcurrent yang dapat merusak motor maupun driver[24]. Selain itu, penggunaan microstepping terbukti dalam berbagai penelitian mampu meningkatkan kehalusan gerakan, mengurangi resonansi mekanik, serta

meningkatkan akurasi positioning dibandingkan full-step operation, khususnya pada aplikasi CNC dan sistem presisi[25]. Dengan kemampuan tersebut, A4988 sangat sesuai untuk mengendalikan motor stepper NEMA 17 tipe 17HS3401 yang memiliki arus nominal 1,3 A per fase.

Tabel 2. 8 Spesifikasi Modul Driver Stepper Motor A4988

Spesifikasi Modul Driver Stepper Motor A4988	
Tipe Driver	Bipolar Stepper Motor Driver
Tegangan Logika (VDD)	3 – 5,5 V
Tegangan Motor (VMOT)	8 – 35 V
Arus Maksimum	Hingga ± 2 A per fase (dengan pendinginan)
Mode Step	Full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Proteksi	Overcurrent, Thermal Shutdown, Undervoltage Lockout
Metode Kontrol Arus	Fixed Off-Time Current Regulation

Pada sistem ini, motor stepper NEMA 17 (17HS3401) dengan arus nominal 1,3 A per fase dikendalikan menggunakan A4988 dengan suplai 12 V dari PSU utama. Tegangan 12 V dipertahankan pada sisi motor untuk menjaga karakteristik torsi pada kecepatan lebih tinggi, sementara arus dibatasi melalui pengaturan Vref agar sesuai dengan rating motor.



Gambar 2. 9 Rangkaian Skematik Diagram Modul A4988

Berdasarkan **Gambar 2.9**, sinyal digital berbentuk pulsa kotak (*square pulse*) yang akan dihasilkan mikrokontroler akan diterima pada pin STEP untuk menentukan jumlah langkah pergerakan motor, serta sinyal logika HIGH/LOW pada pin DIR untuk menentukan arah putaran. Kedua sinyal ini diterima langsung oleh pin STEP dan DIR pada modul A4988. Selain itu, pin ENABLE digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan driver sesuai kebutuhan sistem, sementara suplai logika VDD berasal dari tegangan 3,3 V STM32 dan suplai daya motor (VBB/VMOT) berasal dari sumber eksternal. Mikrokontroler hanya mengendalikan pergerakan melalui sinyal pulsa dan arah, sedangkan proses pengaturan arus dan switching H-bridge ditangani secara internal oleh driver.

2.9. *Push-Pull Solenoid*

Solenoid *push-pull* merupakan aktuator elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi gerakan linier melalui interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan (coil). Ketika arus listrik dialirkan ke dalam kumparan, terbentuk medan magnet yang menarik plunger berbahan feromagnetik menuju pusat kumparan sehingga menghasilkan gaya dorong atau tarik sesuai konstruksi mekanis aktuator[26]. Solenoid banyak digunakan pada sistem otomasi industri karena memiliki waktu respon yang cepat, konstruksi sederhana, serta mampu menghasilkan gaya linier secara langsung tanpa memerlukan mekanisme konversi gerak tambahan. Pada berbagai aplikasi industri, solenoid digunakan sebagai aktuator pada katup pneumatik, katup hidrolik, mekanisme pengunci, dan sistem dispensing.



Gambar 2. 10 Solenoid *Push-Pull*

Gambar 2.10 Merupakan bentuk fisik dari solenoid *pushpull*. Prinsip kerja solenoid didasarkan pada hukum elektromagnetik, yaitu arus listrik yang mengalir melalui kumparan menghasilkan medan magnet yang selanjutnya menarik inti besi (*plunger*) ke arah pusat kumparan. Besarnya gaya elektromagnetik dipengaruhi oleh jumlah lilitan kumparan, besar arus listrik, permeabilitas material, luas penampang inti, serta panjang celah udara (*air gap*) antara plunger dan inti tetap (*core*). Seiring berkurangnya celah udara akibat pergerakan plunger menuju pusat kumparan, gaya elektromagnetik akan meningkat sehingga menghasilkan gerakan linier yang lebih kuat [26].

Tabel 2. 9 Spesifikasi Solenoid Push-Pull

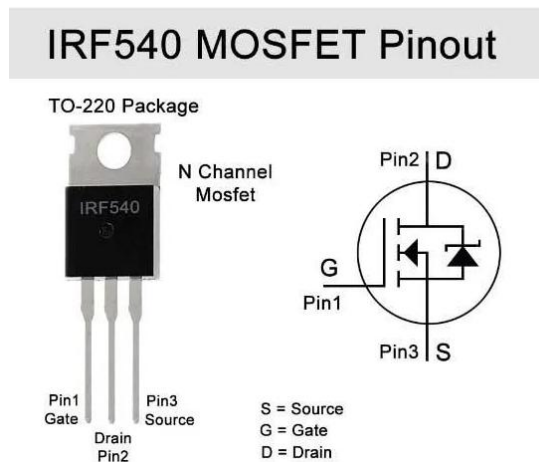
Spesifikasi Solenoid <i>Push-Pull</i>	
Model	JF-0530B
Jenis	Push-Pull Solenoid
Tegangan nominal	6 V DC
Arus nominal	300 mA
Gaya maksimum	5 N
Stroke	10 mm

Berdasarkan **Tabel 2.9**, Solenoid yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe JF-0530B dengan mekanisme push-pull, yaitu aktuator yang mampu menghasilkan gerakan linier pada plunger ketika kumparan diberi tegangan DC sebesar 6 V. Berdasarkan spesifikasi pabrikan, solenoid ini memiliki gaya tarik maksimum sebesar 5 N pada panjang langkah (*stroke*) 10 mm dengan arus nominal 300 mA. Dimensi yang relatif kecil menjadikan aktuator ini sesuai digunakan sebagai mekanisme pengetuk (*knocker*) pada sistem dispenser rempah untuk membantu material yang menempel pada dinding chamber agar jatuh menuju saluran keluaran.

2.10. MOSFET IRF540

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) merupakan komponen semikonduktor yang bekerja sebagai sakelar (*electronic switch*) atau penguat sinyal dengan pengendalian berbasis tegangan (*voltage-controlled device*). Berbeda dengan BJT yang dikendalikan oleh arus basis, MOSFET dikendalikan

oleh tegangan pada terminal gate sehingga memiliki impedansi masukan yang tinggi, konsumsi daya pengendali yang rendah, serta kecepatan pensaklaran yang tinggi. Karakteristik tersebut menjadikan MOSFET banyak digunakan pada sistem elektronika daya, kendali motor, catu daya (*switching power supply*), dan berbagai aplikasi otomasi industri[27].



Gambar 2. 11 IRF540 MOSFET

MOSFET bekerja berdasarkan pembentukan kanal konduksi antara terminal *drain* dan *source* ketika tegangan *gate-source* (V_{GS}) melebihi tegangan ambang (*threshold voltage*). Pada MOSFET tipe *enhancement-mode N-channel*, kanal konduksi baru akan terbentuk setelah diberikan tegangan positif pada terminal gate. Semakin besar tegangan gate yang diberikan hingga mencapai kondisi jenuh, semakin kecil hambatan drain-source ($R_{DS(on)}$) sehingga rugi daya konduksi menjadi lebih rendah[27].

Spesifikasi Solenoid <i>Push-Pull</i>	
Model	IRF540
Tipe	N-Channel Power MOSFET
Package	TO-220AB
Drain-Source Voltage	100 V
Gate-Source Voltage	± 20 V
Continuous Drain Current	28 A
Pulsed Drain Current (I_{DM})	Pulsed Drain Current (I_{DM})

Pada sistem takar dan *dispenser* otomatis yang dikembangkan, MOSFET IRF540 berfungsi sebagai driver untuk mengendalikan solenoid push-pull melalui

sinyal digital yang dihasilkan oleh mikrokontroler STM32. Ketika pin GPIO memberikan logika HIGH pada terminal gate, MOSFET memasuki kondisi ON sehingga arus mengalir menuju kumparan solenoid dan aktuator bergerak melakukan proses pengetukan (*knocking*). Sebaliknya, ketika sinyal gate bernilai LOW, MOSFET berada pada kondisi OFF sehingga arus ke solenoid terputus. Penggunaan MOSFET sebagai sakelar elektronik memungkinkan pengendalian beban dengan arus yang lebih besar dibandingkan kemampuan keluaran GPIO mikrokontroler, sekaligus memberikan kecepatan pensaklaran yang tinggi dan efisiensi daya yang baik[27].

2.11. Load Cell CZL 601

Load cell merupakan sensor berbasis *strain gauge* yang bekerja dengan prinsip perubahan resistansi akibat deformasi elastis material ketika dikenai gaya mekanik. Perubahan resistansi ini dikonversi menjadi sinyal tegangan melalui konfigurasi *Wheatstone bridge* sehingga menghasilkan keluaran analog yang proporsional terhadap beban[28]. Teknologi *strain gauge* banyak digunakan dalam sistem penimbangan presisi karena memiliki sensitivitas tinggi, stabilitas jangka panjang, serta karakteristik linieritas yang baik dalam rentang kerja tertentu[29]. Bentuk fisik dari Loadcell CZL-601 ditunjukkan pada **Gambar 2.12**



Gambar 2. 12 Load cell CZL-601

Dalam penelitian ini, load cell tipe CZL 601 digunakan sebagai sensor utama untuk mengukur massa bumbu secara real-time sebelum sistem menghentikan proses dispensi melalui kendali Propotional. Ketelitian pengukuran massa menjadi variabel umpan balik (*feedback variable*) dalam sistem kontrol tertutup, sehingga karakteristik akurasi, dan ketelitian sensor berpengaruh langsung terhadap performa

sistem[30]. Integrasi load cell dengan modul penguat dan ADC memungkinkan sistem mendeteksi perubahan massa dalam satuan gram, yang krusial dalam aplikasi penakaran bahan pangan.

Tabel 2. 10 Spesifikasi Loadcell CZL-601

Spesifikasi Loadcel CZL-601	
Kapasitas Nominal	3 kg
Nominal Output	$2.0 \pm 0.1 \text{ mV/V}$
Non-linearity	$< \pm 0.03\% \text{ FSO}$
Creep (30 menit)	$< \pm 0.025\% \text{ FSO}$
Safe Load	120% dari kapasitas nominal
Ultimate Load	150% dari kapasitas nominal
Excitation Voltage	9 VDC (maks. 12 VDC)
Input Resistance	$400 \pm 10 \Omega$
Output Resistance	$350 \pm 5 \Omega$

Spesifikasi load cell CZL 601 varian 3 kg menunjukkan karakteristik metrologi yang sesuai untuk sistem takar bumbu otomatis berbasis kendali tertutup. Nilai *non-linearity* kurang dari $\pm 0.03\% \text{ FSO}$ dan *creep* kurang dari $\pm 0.025\% \text{ FSO}$ menunjukkan bahwa sensor memiliki deviasi keluaran yang sangat kecil terhadap perubahan beban dalam rentang kerja nominal, sehingga kesalahan pengukuran dapat diminimalkan selama proses dispensi berlangsung[31]. Nominal output sebesar 2.0 mV/V menghasilkan sinyal diferensial dalam orde milivolt yang proporsional terhadap tegangan eksitasi, sehingga memungkinkan integrasi dengan penguat instrumen dan ADC resolusi tinggi untuk memperoleh resolusi gram-level. Margin *safe load* sebesar 120% dari kapasitas nominal memberikan toleransi terhadap kelebihan beban sesaat (*overload protection*), yang penting dalam aplikasi dispenser berbasis motor di mana terjadi dinamika massa saat bahan jatuh ke wadah. Nilai tegangan keluaran pada konfigurasi *Wheatstone bridge* penuh dinyatakan sebagai,

$$V_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \frac{V_{exc}}{4} \quad (2.8)$$

Dengan V_{out} merupakan tegangan keluaran diferensial dari rangkaian jembatan yang akan dibaca oleh rangkaian penguat atau ADC. ΔR adalah perubahan resistansi pada elemen *strain gauge* akibat adanya beban. R menyatakan resistansi nominal *strain gauge* dalam kondisi tanpa beban. V_{exc} adalah tegangan eksitasi DC yang diberikan ke rangkaian *Wheatstone bridge* (pada CZL 601 direkomendasikan 9 VDC, maksimum 12 VDC).

2.12. Modul ADC HX711

HX711 merupakan *precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC)* yang dirancang khusus untuk aplikasi sistem penimbangan berbasis *load cell* dengan keluaran *Wheatstone bridge*. IC ini mengintegrasikan *low-noise programmable gain amplifier (PGA)* dengan penguatan 32, 64, atau 128 kali, sehingga mampu menguatkan sinyal diferensial dalam orde milivolt menjadi level yang dapat diproses secara digital[32]. HX711 juga menyediakan dua kanal input diferensial serta antarmuka komunikasi serial dua-kawat (PD_SCK dan $DOUT$) yang sederhana untuk integrasi dengan mikrokontroler. Bentuk fisik dari modul ADC 24 Bit HX711 ditunjukkan pada **Gambar 2.13** berikut,



Gambar 2. 13 Modul ADC HX711

Dalam penelitian ini, modul HX711 digunakan untuk mengonversi sinyal analog milivolt dari load cell CZL 601 menjadi data digital 24-bit yang kemudian diproses oleh mikrokontroler STM32F411CEU6. Resolusi 24-bit memungkinkan sistem mendeteksi perubahan massa dalam skala gram secara presisi, yang sangat penting dalam sistem takar bumbu otomatis berbasis kendali PI. Selain itu,

selectable data rate sebesar 10 SPS atau 80 SPS memungkinkan kompromi antara resolusi dan respons sistem terhadap dinamika massa saat proses dispensi berlangsung[32], [33].

Tabel 2. 11 Spesifikasi Modul ADC HX711

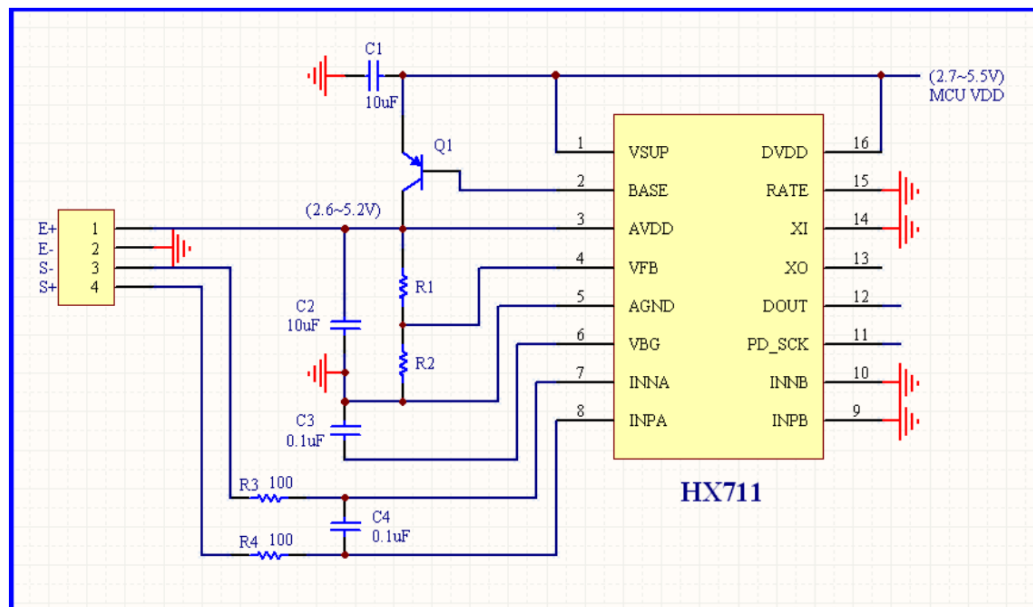
Spesifikasi Modul ADC HX711	
Resolusi ADC	24-bit
PGA Gain	32, 64, 128
Input Channel	2 kanal diferensial
Data Rate	10 SPS / 80 SPS
Supply Voltage	2.6 – 5.5 V
Interface	Two-wire serial (PD_SCK, DOUT)

Spesifikasi tersebut menunjukkan bahwa HX711 sangat sesuai untuk aplikasi sistem penimbangan presisi berbasis *strain gauge*. Resolusi 24-bit secara teoritis memberikan kemampuan diskriminasi sinyal yang sangat kecil, sehingga perubahan tegangan dalam orde mikrovolt akibat variasi massa dapat dideteksi secara stabil[32]. Fitur *programmable gain amplifier* hingga 128 kali memungkinkan optimasi rentang dinamis sesuai dengan sensitivitas load cell 2.0 mV/V yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, konsumsi daya rendah serta integrasi internal regulator menjadikan modul ini kompatibel dengan sistem tertanam berbasis mikrokontroler berbasis ARM seperti STM32. Secara matematis, proses konversi hasil pembacaan ADC menjadi satuan massa (gram) dilakukan melalui persamaan kalibrasi linier,

$$m = \frac{(D - D_0)}{S} \quad (2.9)$$

di mana m adalah massa dalam satuan gram, D merupakan nilai digital hasil pembacaan ADC HX711, D_0 adalah nilai pembacaan saat kondisi tanpa beban (*offset* atau *tare value*), dan S adalah faktor skala (*calibration factor*) dalam satuan count per gram yang diperoleh melalui proses kalibrasi menggunakan beban referensi. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa massa dihitung dari selisih pembacaan aktual terhadap nilai nol, kemudian dibagi dengan faktor kalibrasi yang merepresentasikan sensitivitas sistem secara keseluruhan (kombinasi load cell dan

HX711). Dengan pendekatan ini, keluaran digital 24-bit dari HX711 dapat dikonversi secara langsung menjadi nilai massa dalam gram yang digunakan sebagai variabel umpan balik pada sistem kendali PID.

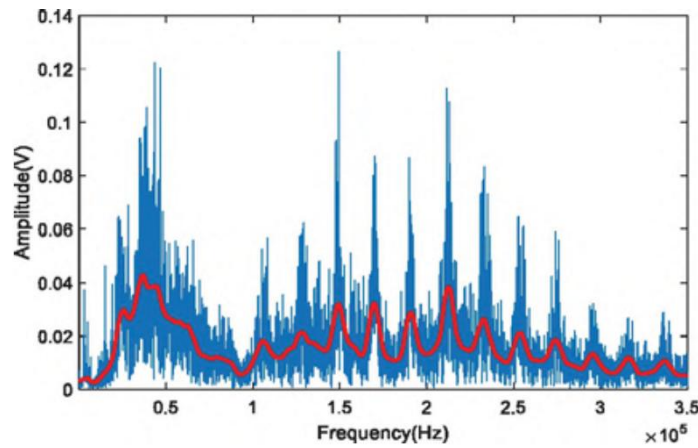


Gambar 2. 14 Skematik Rangkaian Modul ADC HX711

Berdasarkan **Gambar 2.14**, sinyal analog dari load cell masuk melalui terminal E+, E-, S+, dan S-, di mana E+ dan E- berfungsi sebagai tegangan eksitasi jembatan *Wheatstone*, sedangkan S+ dan S- merupakan keluaran diferensial yang membawa sinyal tegangan dalam orde milivolt. Tegangan diferensial ini kemudian masuk ke pin INPA (pin 8) dan INNA (pin 7) pada IC HX711 sebagai masukan kanal A. Karena sinyal dari load cell sangat kecil (sekitar beberapa mV), HX711 terlebih dahulu memperkuatnya menggunakan *programmable gain amplifier (PGA)* internal dengan penguatan yang dapat dipilih (32, 64, atau 128 kali) sebelum dilakukan proses konversi analog-ke-digital[32]. Hasil konversi digital kemudian dikeluarkan melalui pin DOUT (pin 12) dalam format data serial, yang disinkronkan oleh pulsa clock dari pin PD_SCK (pin 11) yang dikendalikan oleh mikrokontroler. Setiap pulsa clock akan menggeser satu bit data dari register internal HX711 hingga 24-bit data terbaca penuh.

2.13. Median Filter

Median filter merupakan metode penyaringan sinyal non-linear berbasis teknik *order statistics* yang bekerja dengan menggantikan setiap sampel sinyal dengan nilai median dari sejumlah sampel tetangganya dalam suatu jendela (window) tertentu[34]. Median filter tidak melakukan operasi konvolusi, melainkan proses pengurutan (sorting). Karena sifatnya yang non-linear, median filter sangat efektif dalam menghilangkan *impulsive noise* atau *salt-and-pepper noise* tanpa mereduksi amplitudo puncak sinyal secara signifikan. Metode ini banyak digunakan pada pengolahan sinyal sensor dan citra digital karena kemampuannya mempertahankan tepi (edge preservation) dan bentuk transien.



Gambar 2. 15 Grafik Noise Sebelum dan Sesudah Filter Median

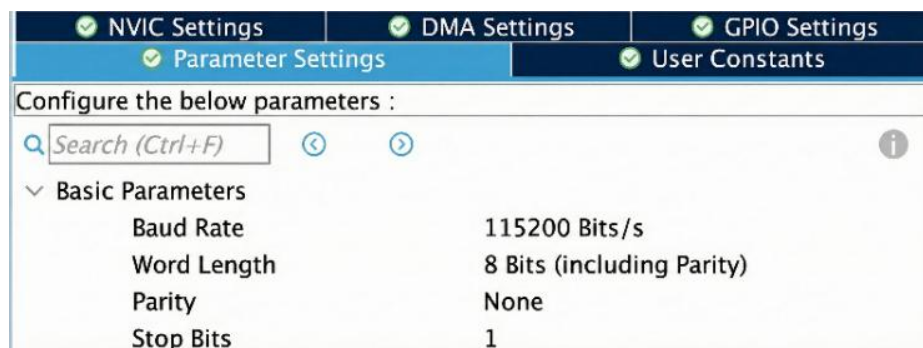
Berdasarkan **Gambar 2.16** [35] spektrum frekuensi yang ditampilkan, terlihat bahwa sinyal sebelum difilter (warna biru) memiliki banyak lonjakan tajam pada berbagai frekuensi, yang mengindikasikan adanya komponen noise berenergi tinggi dan tersebar di spektrum. Setelah diterapkan median filter (garis merah), spektrum menjadi jauh lebih halus dan amplitudo lonjakan acak berkurang secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa median filter efektif dalam meredam komponen noise yang bersifat acak dan diskontinu tanpa menghilangkan komponen frekuensi dominan utama. Persamaan Median filter dirumuskan pada Persamaan 2.10

$$X_{med} = \text{median}\{x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-(n-1)}\} \quad (2. 10)$$

di mana X_{med} adalah keluaran filter median, x_t adalah deret data mentah masukan dari ADC, dan n adalah ukuran jendela sampel. Akan digunakan 5 sampel untuk diambil mediannya secara berkala. Filter ini akan diterapkan pada pembacaan data integer mentah dari loadcell sebelum masuk keadalam persamaan kalibrasi. Sehingga *spike* yang dihasilkan dapat teredam pada penerapannya.

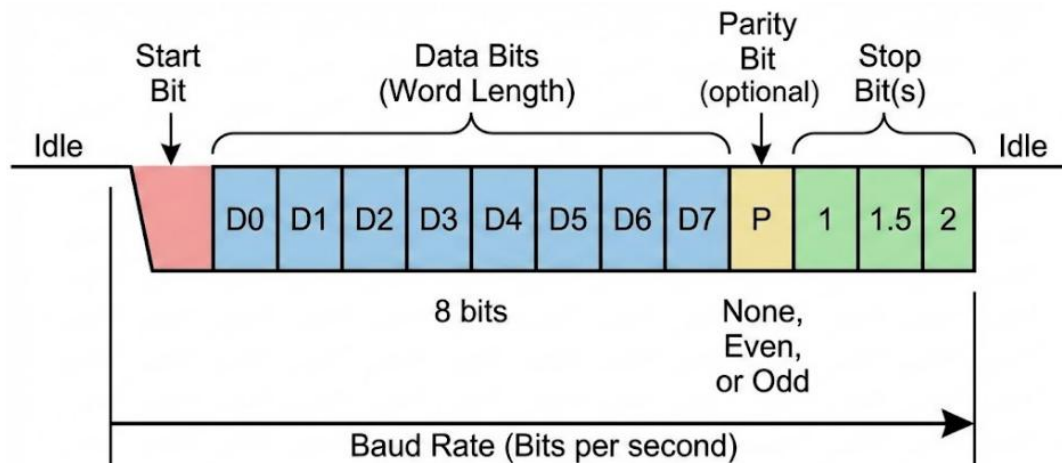
2.14. Universal Asynchronous Reciver Transmitter (UART)

Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) merupakan protokol komunikasi serial asinkron yang banyak digunakan pada sistem tertanam untuk pertukaran data antar perangkat tanpa memerlukan sinyal clock bersama. Komunikasi UART bekerja dengan mengirimkan data secara bit-per-bit melalui jalur TX (*transmit*) dan RX (*receive*) dengan *data frame* tertentu yang terdiri dari *start bit*, *data bits*, *parity bit* (opsional), dan *stop bit*[36]. Karena bersifat asinkron, sinkronisasi dilakukan berdasarkan kesepakatan parameter komunikasi antara pengirim dan penerima. Tampilan konfigurasi UART pada STM32 CubeIDE ditunjukkan **Gambar 2.17**



Gambar 2. 16 Konfigurasi Parameter Komunikasi USART pada STM32 MX

Dalam penelitian ini, UART digunakan sebagai media komunikasi antara STM32F411CEU6 dan Raspberry Pi Zero 2W untuk mengirimkan data hasil pembacaan massa maupun perintah kendali sistem. Keandalan komunikasi sangat bergantung pada kesesuaian parameter konfigurasi di kedua sisi perangkat. Seperti terlihat pada **Gambar 2.17** parameter utama yang dapat diatur dalam komunikasi UART meliputi *baud rate*, *word length*, *parity*, dan *stop bit*, yang masing-masing memengaruhi kecepatan, efisiensi, serta tingkat deteksi kesalahan transmisi[36].



Gambar 2. 17 Data Frame Komunikasi UART

Pada **Gambar 2.18** merupakan *Data Frame* dasar dari pertukaran data dengan metode UART. *Baud rate* menyatakan jumlah karakter yang dikirim per detik, umumnya dinyatakan dalam satuan *bit per second* (bps). Nilai yang umum digunakan adalah 9600 bps, 115200 bps, dan seterusnya. Semakin tinggi *baud rate*, semakin cepat data dikirim, namun sensitivitas terhadap gangguan dan kesalahan sinkronisasi juga meningkat, terutama pada jalur komunikasi yang panjang atau terpapar noise[36]. *Word length* menentukan jumlah bit data dalam satu frame, biasanya 7, 8, atau 9 bit. Konfigurasi 8-bit merupakan standar yang paling umum karena kompatibel dengan representasi karakter ASCII dan data biner umum. Pemilihan panjang data memengaruhi jumlah informasi yang dapat dikirim dalam satu siklus transmisi[36]. Parity merupakan mekanisme deteksi *error* sederhana yang menambahkan satu bit tambahan untuk memastikan jumlah logika '1' dalam frame data bersifat genap (*even parity*) atau ganjil (*odd parity*). Jika terjadi perubahan bit selama transmisi, kesalahan dapat dideteksi oleh penerima melalui ketidaksesuaian paritas. Meskipun tidak mampu melakukan koreksi kesalahan, fitur ini meningkatkan keandalan komunikasi pada sistem tertanam. *Stop bit* menandai akhir dari satu frame data dan memberikan waktu bagi penerima untuk melakukan sinkronisasi ulang sebelum frame berikutnya dikirim. Konfigurasi umum adalah 1 atau 2 stop bit. Penambahan stop bit meningkatkan stabilitas komunikasi namun menurunkan efisiensi karena memperpanjang durasi satu frame transmisi[36].

2.15. JavaScript Object Notation (JSON)

JavaScript Object Notation (JSON) merupakan format pertukaran data berbasis teks yang ringan (*lightweight data-interchange format*) dan dirancang agar mudah dibaca manusia serta mudah diproses oleh mesin. JSON merepresentasikan data dalam struktur pasangan *key-value* dan mendukung tipe data seperti *string*, *number*, *boolean*, *array*, dan *object* bersarang (*nested object*)[37]. Karena bersifat independen terhadap bahasa pemrograman, JSON banyak digunakan dalam komunikasi antar sistem tertanam dan aplikasi berbasis jaringan. Isi format data dari format JSON ditunjukkan pada **Gambar 2.19** berikut

```
{
  "color": {
    "primary": "#0055FF",
    "secondary": "#6600CC",
    "success": "#2EBD85",
    "caution": "#F5A623",
    "danger": "#D7263D"
  },
  "typography": {
    "fontFamily": "Inter, sans-serif",
    "fontSize": "16px",
    "fontWeight": "600",
    "textTransform": "uppercase"
  },
  "spacing": {
    "xs": "4px",
    "sm": "8px",
    "md": "16px",
    "lg": "32px"
  },
  "border": {
    "radius": "8px",
    "width": "1px",
    "color": "#E0E0E0"
  }
}
```

Gambar 2. 18 Format Frame JSON

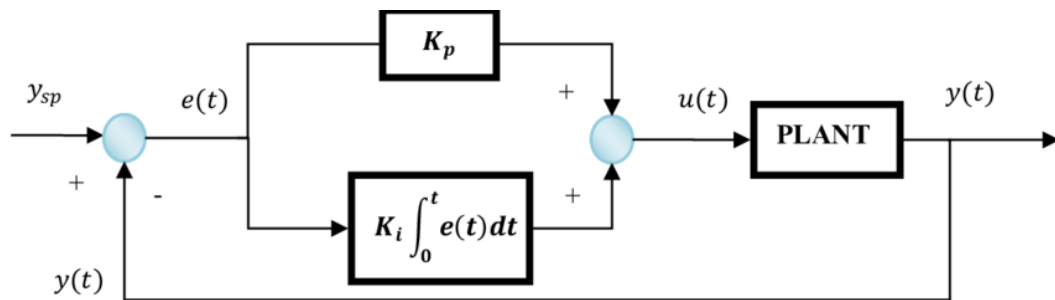
Dalam penelitian ini, JSON digunakan sebagai format enkapsulasi data yang dikirim melalui komunikasi UART antara STM32F411CEU6 dan Raspberry Pi Zero 2W. Data hasil pembacaan massa dari load cell yang telah diproses oleh mikrokontroler dikemas dalam struktur JSON sebelum dikirimkan ke Raspberry Pi untuk ditampilkan pada antarmuka atau disimpan ke sistem. Penggunaan JSON memungkinkan representasi data yang terstruktur, Struktur tersebut mempermudah proses *parsing* dan validasi data di sisi penerima serta mendukung skalabilitas sistem jika di kemudian hari ditambahkan parameter lain seperti waktu (*timestamp*) atau nilai *setpoint*. Secara formal, struktur dasar objek JSON dapat direpresentasikan sebagai,

$$Object = \{ (key: value)_n \} \quad (2.11)$$

di mana *key* merupakan string unik sebagai penanda variabel, dan *value* adalah nilai data yang dapat berupa tipe primitif maupun objek/array lainnya. Representasi ini bersifat hierarkis sehingga memungkinkan pembentukan struktur data kompleks dalam satu paket transmisi[37], [38].

2.16. Pengendali Propotional-Integral

Pengendali Proportional–Integral (PI) merupakan salah satu metode kendali umpan balik (*feedback control*) yang banyak digunakan pada sistem industri karena memiliki struktur yang sederhana serta mampu mengurangi *steady-state error* dengan tetap memberikan respons yang baik terhadap perubahan kondisi sistem[39]. Pengendali PI merupakan penyederhanaan dari kendali PID dengan menghilangkan aksi derivatif, sehingga lebih sesuai diterapkan pada sistem yang tidak memerlukan peredaman perubahan sinyal yang sangat cepat atau memiliki tingkat *noise* pengukuran yang tinggi[40]. Diagram blok pengendalian sistem Proportional Integral ditunjukkan pada **Gambar 2.20**



Gambar 2. 19 Diagram Kendali *Proportional Integral*

Pada penelitian ini, pengendali PI digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor DC pada mekanisme dispenser. Kecepatan aktual motor diperoleh dari pembacaan encoder sebagai sinyal umpan balik (*feedback*), sedangkan nilai referensi (*setpoint*) ditentukan sesuai kecepatan yang diinginkan selama proses dispensing. Selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual dinyatakan sebagai sinyal kesalahan (*error*) yang dirumuskan melalui persamaan 2.12

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.12)$$

dengan $r(t)$ merupakan kecepatan referensi dan $y(t)$ merupakan kecepatan aktual motor hasil pembacaan encoder.

Sinyal *error* tersebut menjadi masukan bagi pengendali PI untuk menghasilkan sinyal kendali $u(t)$ yang mengatur nilai PWM pada motor DC melalui *driver*. Dengan adanya pengendalian ini, kecepatan motor dapat dipertahankan tetap mendekati nilai referensi meskipun terjadi perubahan beban akibat variasi kepadatan material di dalam dispenser.[39]. Persamaan umum pengendali PI dalam domain waktu dinyatakan melalui persamaan 2.13,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

di mana K_p merupakan konstanta penguatan proporsional yang menentukan besarnya respons terhadap kesalahan saat ini, sedangkan K_i merupakan konstanta integral yang mengakumulasi kesalahan dari waktu ke waktu sehingga mampu menghilangkan *steady-state error*. Kombinasi kedua parameter tersebut memungkinkan sistem mempertahankan kecepatan motor secara stabil dan meningkatkan konsistensi proses dispensing meskipun terjadi gangguan beban[39], [40].

Penentuan nilai parameter K_p dan K_i pada pengendali PI dapat dilakukan menggunakan metode Ziegler–Nichols berdasarkan respon langkah (*step response*)[41]. Metode ini dilakukan dengan memberikan masukan berupa sinyal langkah (*step input*) pada sistem terbuka (*open-loop*) kemudian mengamati kurva respon yang diberikan garis singgung pada kenaikan keluarannya. Berdasarkan kurva dan garis singgung tersebut diperoleh parameter karakteristik sistem berupa waktu tunda (*dead time*), L , dan konstanta waktu (*time constant*), T , yang selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter awal pengendali PI sesuai aturan penalaan Ziegler–Nichols[41]. Aturan penalaan untuk sistem orde satu berdasarkan metode *step response* ditunjukkan pada **Tabel 2.12** berikut.

Tabel 2. 12 Aturan Penalaan Ziegler Nichols Metode 1

Tipe Pengndali	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Berdasarkan **Tabel 2.12** [41], parameter pengendali PI dihitung menggunakan persamaan (2.14) dan persamaan (2.15). berikut.

$$K_p = 0.9 \frac{T}{L} \quad (2.14)$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} \quad (2.15)$$

ditunjukkan pada Persamaan (2.14) dan Persamaan (2.15). L sebagai waktu tunda (*dead time*), T sebagai konstanta waktu (*time constant*), sedangkan T_i menunjukkan waktu integral yang menentukan kecepatan aksi integral (*steady-state error*) [41]. Untuk memperoleh konstanta integral (K_i), dilakukan dengan menurunkan persamaan umum pengendali PI pada persamaan 2.13 bagian integral sehingga diperoleh konstanta integral sebagai persamaan 2.16 berikut

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2.16)$$

dengan K_p merupakan konstanta proporsional, K_i merupakan konstanta integral dan T_i merupakan waktu integral (*integral time*).

2.17. Switched Mode Power Supply

Switched Mode Power Supply (SMPS) merupakan catu daya yang bekerja dengan prinsip pensaklaran frekuensi tinggi untuk mengubah energi listrik secara efisien melalui kombinasi rangkaian *switching*, transformator frekuensi tinggi, dan rangkaian penyearah serta filter keluaran. Berbeda dengan regulator linear, SMPS

memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena elemen saklar (umumnya MOSFET) beroperasi pada kondisi saturasi atau cut-off sehingga rugi daya disipatif dapat diminimalkan[42]. Topologi yang umum digunakan pada catu daya 12V 5A adalah tipe *flyback* atau *forward converter*, yang mampu menyediakan isolasi galvanik antara sisi primer dan sekunder[43]. Bentuk fisik dari SMPS 12V 5A yang akan digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.21** berikut,



Gambar 2. 20 SMPS 12V 5A

Dalam penelitian ini, SMPS 12V 5A digunakan sebagai sumber utama untuk mensuplai motor DC dispenser, modul driver, serta regulator turunan (*step-down*) menuju level 5V dan 3.3V untuk Raspberry Pi Zero 2W dan STM32F411CEU6. Stabilitas tegangan keluaran dan kemampuan arus maksimum menjadi parameter penting karena fluktuasi tegangan akibat beban dinamis motor dapat memengaruhi kestabilan sistem kontrol dan akurasi pembacaan sensor[43].

Tabel 2. 13 Spesifikasi SMPS 12V 5A.

Spesifikasi SMPS 12V 5A	
Tegangan Input	100–240 VAC, 50/60 Hz
Tegangan Output	12 VDC
Arus Maksimum	5A
Daya Maksimum	60 W
Efisiensi	$\geq 80\%$
Ripple & Noise	$< 120 \text{ mVp-p}$
Proteksi	Over-voltage, Over-current, Short-circuit

Berdasarkan **Tabel 2.13** spesifikasi tersebut, catu daya yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan sumber tegangan 220V AC *single phase*. Sebagai keluarannya, catu daya ini mampu menghasilkan tegangan 12V DC dengan arus maksimal sebesar 5 Ampere. Dengan demikian, sistem masih memiliki *headroom* sumber daya yang cukup untuk memenuhi kebutuhan daya dari Raspberry Pi, STM32, Motor Stepper, Motor DC dan Loadcell. Secara umum, hubungan daya pada catu daya dinyatakan sebagai,

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (2.17)$$

Efisiensi SMPS dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.18)$$

dengan η adalah efisiensi konversi, P_{out} daya keluaran, dan P_{in} daya masukan. Nilai efisiensi yang tinggi (umumnya >80%) menunjukkan bahwa sebagian besar daya masukan berhasil dikonversi menjadi daya keluaran dengan rugi-rugi minimal[42], [43]. Dalam sistem dispenser otomatis, efisiensi dan stabilitas SMPS berperan penting dalam menjaga kinerja aktuator dan kestabilan sistem kendali secara keseluruhan.

2.18. LM2596

LM2596 merupakan regulator tegangan tipe *buck converter* berbasis teknik *switching* yang dirancang untuk menurunkan tegangan DC dengan efisiensi tinggi. IC ini bekerja dengan prinsip pensaklaran frekuensi tetap (sekitar 150 kHz) yang mengendalikan transistor internal secara *pulse-width modulation (PWM)*, sehingga energi ditransfer melalui induktor dan disaring oleh kapasitor keluaran untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil[44]. Dibandingkan regulator linear, konverter *buck* seperti LM2596 memiliki efisiensi lebih tinggi karena disipasi daya pada elemen aktif relatif kecil akibat operasi pada mode saklar[45]. Bentuk fisik dari modul *DC-DC Converter* ditunjukkan pada **Gambar 2.22**



Gambar 2. 21 Modul Step Down LM2596

Dalam penelitian ini, modul LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan 12V dari SMPS menjadi 5V dan/atau 3.3V yang dibutuhkan oleh Raspberry Pi Zero 2W, STM32F411CEU6, serta modul sensor. Penggunaan step-down converter menjadi krusial karena sistem memiliki beban digital dan analog yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan. Stabilitas keluaran dan efisiensi daya secara langsung memengaruhi performa sistem kendali dan akurasi pembacaan sensor.

Tabel 2. 14 Spesifikasi Modul Stepdown LM2596

Spesifikasi Modul LM2596	
Tegangan Input	4 – 40 VDC
Tegangan Output	Adjustable (1.23 – 37 V)
Arus Maksimum	3.0 A
Frekuensi Switching	150 kHz
Efisiensi	Hingga 80–90%
Topologi	Buck Converter (Step-Down)

Berdasarkan **Tabel 2.14**, menunjukkan bahwa LM2596 mampu menerima masukan 12V dari SMPS dan menurunkannya secara stabil ke level tegangan yang dibutuhkan sistem logika. Arus maksimum 3A memberikan margin yang cukup untuk menyuplai Raspberry Pi dan rangkaian pendukung. Frekuensi switching 150 kHz memungkinkan penggunaan induktor dan kapasitor dengan ukuran relatif kecil, sehingga modul menjadi kompak tanpa mengorbankan stabilitas keluaran[44]. Efisiensi tinggi (hingga 90%) juga membantu mengurangi panas dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Secara matematis, hubungan ideal antara tegangan masukan dan keluaran pada konverter buck dinyatakan sebagai:

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (2.19)$$

di mana V_{out} adalah tegangan keluaran, V_{in} adalah tegangan masukan, dan D adalah *duty cycle* PWM (rasio waktu aktif terhadap periode switching). Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran dikontrol melalui pengaturan *duty cycle* transistor internal. Dalam implementasinya, rangkaian umpan balik internal LM2596 secara otomatis menyesuaikan *duty cycle* untuk menjaga tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban.