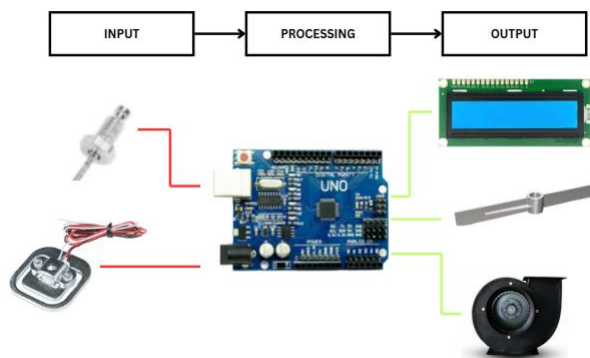


BAB II

DASAR TEORI

2.1 Sistem Agitator Otomatis

Agitator merupakan alat mekanik yang berfungsi mengaduk atau menghomogenisasi material dalam wadah dengan menggunakan poros dan *paddle* atau *impeller* yang berputar. Pada sistem otomatis, agitator digerakkan motor listrik yang kecepatan dan waktunya dikendalikan oleh mikrokontroler berdasarkan masukan sensor. Sensor suhu mengukur temperatur bahan sehingga motor agitator dapat disesuaikan kecepatannya untuk mengoptimalkan perpindahan panas dan mencegah proses berlebih. Sensor berat (*load cell*) mengukur massa bahan dalam wadah, sehingga waktu dan intensitas pengadukan diatur adaptif menyesuaikan dengan jumlah bahan yang diproses. Mikrokontroler seperti ATmega328P mengolah data sensor suhu dan berat secara real-time untuk mengatur motor DC pengaduk secara tepat dan efisien. Bentuk *paddle* atau dayung sebagai agitator efektif untuk mengaduk bahan padat seperti biji kopi hingga panas terdistribusi merata tanpa merusak material. Sistem agitator otomatis ini meningkatkan efisiensi proses, konsistensi hasil, dan mengurangi intervensi tenaga manusia dalam proses pengolahan, seperti pendinginan biji kopi pada skala home industry.



Gambar 2.1 Sistem Agitator Otomatis

Gambar 2.1 merupakan sebuah sistem berbasis mikrokontroler yang terdiri dari tiga bagian utama : *input*, pemrosesan, dan *output*. Pada bagian *input*, terdapat dua sensor yang berfungsi untuk mengumpulkan data penting dalam

proses pendinginan biji kopi. Sensor suhu digunakan untuk mengukur suhu biji kopi yang sedang diproses[8]. Data suhu yang diterima oleh sensor ini kemudian dikirimkan ke mikrokontroler untuk diproses, sehingga dapat mengatur suhu pada sistem pendinginan [9]. Selain itu, terdapat sensor berat (*load cell*) yang berfungsi untuk mengukur berat biji kopi. Sensor ini memberikan informasi terkait jumlah biji kopi yang sedang diproses, yang nantinya akan digunakan untuk menyesuaikan parameter proses, seperti kecepatan agitasi atau pengaturan suhu yang sesuai dengan berat biji kopi [9].

Bagian pemrosesan dalam gambar ini diwakili oleh mikrokontroler Arduino UNO. Mikrokontroler ini bertugas untuk menerima *input* dari sensor suhu dan sensor berat, lalu memproses informasi tersebut sesuai dengan program yang telah ditentukan. Berdasarkan data yang diterima, mikrokontroler akan mengontrol komponen *output* agar sistem pendinginan berjalan dengan optimal. Proses pemrosesan ini mencakup pengaturan kecepatan agitasi dan suhu, sehingga proses pendinginan biji kopi dapat dilakukan secara efisien dan merata [10].

Pada bagian *output*, terdapat dua komponen utama yang bekerja berdasarkan hasil pemrosesan dari mikrokontroler. Pertama, LCD Display yang digunakan untuk menampilkan informasi terkait suhu dan berat biji kopi secara *real-time*, sehingga pengguna dapat memantau kondisi proses pendinginan. Kedua, Agitator (Dayung) yang berfungsi untuk mengaduk biji kopi secara merata selama proses pendinginan. Agitator ini bergerak sesuai dengan pengaturan kecepatan yang dikendalikan oleh mikrokontroler, memastikan pengadukan yang efektif untuk hasil yang optimal. Selain itu, ada juga Kipas Pendingin yang digunakan untuk membantu proses pendinginan dengan meniupkan udara pada biji kopi sesuai kebutuhan yang telah ditentukan oleh system [2].

Secara keseluruhan, sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas dalam proses pendinginan biji kopi pada skala *home industry*, dengan memastikan kontrol suhu dan agitasi yang lebih akurat serta otomatis.

2.2 Pemrosesan Sinyal

Pemrosesan sinyal dari analog kemudian diubah menjadi data digital melalui proses yang disebut konversi *analog to digital* (ADC). Sinyal *analog* adalah sinyal kontinu yang berubah secara halus terhadap waktu dan amplitudo, misalnya tegangan keluaran sensor suhu atau berat. ADC mengubah sinyal *analog* yang kontinu ini menjadi sinyal digital yang diskrit, yang berarti sinyal tersebut diubah ke dalam bentuk nilai numerik biner dalam interval waktu tertentu. Proses ADC terdiri dari beberapa tahap utama: pencuplikan (*sampling*), kuantisasi (*quantizing*), dan pengkodean (*encoding*). Pencuplikan mengambil nilai sinyal *analog* pada interval waktu diskrit, menghasilkan sampel sinyal [11]. Kuantisasi mengelompokkan nilai-nilai sampel tersebut ke dalam level-level diskrit sesuai resolusi ADC, misalnya ADC 8-bit menghasilkan 256 level diskrit. Pengkodean mengubah level kuantisasi menjadi kode biner yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Nilai digital inilah yang kemudian diproses dalam sistem digital untuk pengendalian atau analisis lebih lanjut. ADC sangat penting dalam sistem otomasi dan pengukuran, karena kebanyakan sensor mengeluarkan sinyal *analog*, sedangkan pengolah data digital seperti mikrokontroler memerlukan input berupa data *digital*. Proses ADC memastikan informasi yang diambil dari sensor dapat digunakan secara efektif dalam sistem *digital* dengan akurasi dan kecepatan *sampling* yang sesuai kebutuhan aplikasi [12].

2.3 Analog to Digital Converter (ADC)

Analog to Digital Converter adalah sebuah sistem elektronik yang berfungsi untuk mengubah sinyal *analog*, yaitu sinyal yang bersifat *kontinu* terhadap waktu menjadi sinyal digital yang bersifat diskrit terhadap waktu. ADC merupakan sistem elektronik yang memiliki *input analog*, *input* tegangan referensi dan *output* digital. Keluaran dari ADC berupa resolusi jumlah bit biner yang menyatakan banyaknya kemungkinan kode yang muncul [13].

$$BIT = 2^n \quad (2.1)$$

Dari perumusan 2.1, n menyatakan jumlah bit. Jika dalam ADC 12 bit terdapat 4096 kemungkinan nilai biner yang muncul (0 hingga 4095). Nilai yang dihasilkan ADC dipengaruhi oleh tegangan *input analog*, tegangan referensi, dan jumlah kemungkinan kode *digital* yang dapat dihasilkan dari perumusan 2.2 [8].

$$ADC = \frac{V_{in}}{V_{REF}} BIT \quad (2.2)$$

2.4 Nilai *Error* dan Akurasi Sensor

Error adalah kejadian pada program yang tidak sesuai dengan yang diharapkan karena kesalahan dari pemrogram. *Error* bersifat terprediksi dan dapat ditangani kejadiannya. Secara umum, *error* adalah kesalahan, pengertian *error* dapat dikelompokkan sesuai dengan penggunaan katanya. Seperti *error* dalam perhitungan data yang tidak dapat membaca atau menampilkan data [14].

$$Error = \left(\frac{\text{Nilai pengukuran} - \text{Nilai aktual}}{\text{Nilai aktual}} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

Akurasi sensor adalah ukuran yang menunjukkan seberapa dekat hasil pengukuran sensor dengan nilai sebenarnya atau nilai standar yang diterima. Dalam konteks pengukuran, akurasi mencerminkan tingkat kebenaran data yang dihasilkan alat ukur dibandingkan dengan nilai referensi [15].

$$Akurasi = 100\% - Error \quad (2.4)$$

2.5 Sistem *Input* Alat

2.5.1 *Thermocouple* Type K

Thermocouple tipe K adalah salah satu jenis sensor suhu yang paling umum digunakan untuk pengukuran suhu dalam berbagai aplikasi, termasuk di bidang industri, otomotif, dan elektronik. *Thermocouple* ini terdiri dari dua kawat logam yang berbeda jenis, biasanya berupa nikel-aluminium dan nikel-kromium. Ketika kedua logam ini disatukan dan terpapar suhu yang berbeda, mereka menghasilkan tegangan kecil yang disebut "tegangan termokopel".

Tegangan ini sebanding dengan perbedaan suhu antara ujung pengukuran dan titik referensi (biasanya suhu lingkungan). Tegangan yang dihasilkan oleh *thermocouple* tipe K dapat digunakan untuk menghitung suhu dengan akurasi yang tinggi [16].

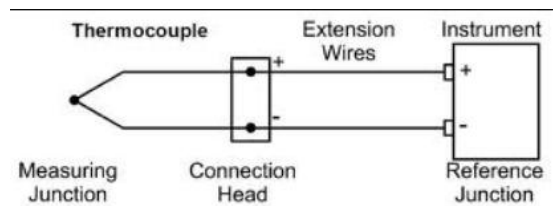
Thermocouple Type K didasarkan pada prinsip efek *Seebeck*, yaitu fenomena termolistrik dimana tegangan listrik dihasilkan oleh sambungan dua logam berbeda yang suhu ujung-ujungnya berbeda. *Thermocouple Type K* terdiri dari dua kawat logam paduan Chromel (Ni-Cr) dan Alumel (Ni-Al) yang disambungkan. Ketika ujung pengukuran (*hot junction*) terkena suhu tertentu berbeda dari ujung referensi (*cold junction*), akan timbul beda potensial (tegangan thermo-EMF) yang sebanding dengan perbedaan temperatur tersebut. Tegangan ini kemudian dikonversi menjadi nilai suhu dengan menggunakan hubungan linear atau tabel kalibrasi yang spesifik untuk Type K, yang memiliki rentang pengukuran efektif sekitar -200 °C hingga 1200 °C.

Rumus kalibrasi sederhana *thermocouple* Type K dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = \frac{V_{out} - V_{ref}}{S} \quad (2.5)$$

- T = suhu *hot junction* (derajat Celsius)
- V_{out} = tegangan keluaran dari *thermocouple* (mV)
- V_{ref} = tegangan referensi dari *cold junction* (mV)
- S = sensitivitas *thermocouple Type K*, sekitar 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ atau 0.041 mV/°C

Namun, *thermocouple* tipe K menghasilkan sinyal tegangan yang sangat kecil (*mikrovolt*) yang tidak dapat dibaca langsung oleh mikrokontroler seperti Arduino. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pembaca *thermocouple* atau converter untuk mengubah sinyal analog tersebut menjadi data digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Salah satu modul yang sering digunakan untuk tujuan ini adalah MAX6675 [17].



Gambar 2.2 Cara Kerja Thermocouple [18]

Pada Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian pengukuran suhu menggunakan termokopel. Ujung termokopel membentuk *measuring junction* (titik ukur) yang menghasilkan tegangan kecil akibat perbedaan suhu. Tegangan ini diteruskan melalui *connection head* dan *extension wires* menuju instrument (alat ukur). Di dalam instrument terdapat *reference junction* (titik referensi/kompensasi) yang menjadi acuan agar pembacaan suhu lebih akurat meskipun suhu di ujung kabel atau lingkungan berubah.



Gambar 2.3 Bentuk Fisik Thermocouple Type K [19]

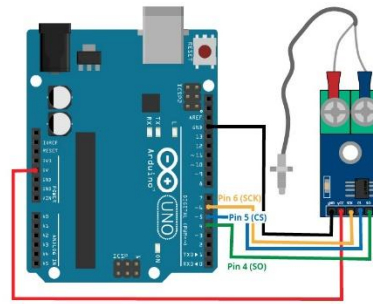
Pada Gambar 2.3 menunjukkan sensor termokopel tipe *probe* (umumnya Type K) yang digunakan untuk mengukur suhu pada rentang tinggi. Sensor ini berbentuk batang logam (*probe*) agar mudah dimasukkan ke media yang diukur, sementara kabel panjangnya menyalurkan sinyal tegangan kecil hasil efek Seebeck ke rangkaian pembaca (modul MAX6675). Karena responnya cepat dan tahan panas, termokopel probe sering dipakai pada proses industri maupun aplikasi pemantauan suhu seperti pemanggangan atau pendinginan.

Tabel 2.1 Spesifikasi Thermocouple Type K [20]

Spesifikasi	Detail
Komposisi logam	Chromel (Ni-Cr) dan Alumel (Ni-Al)
Rentang suhu	-200°C hingga +1260°C
Tegangan output	Sekitar 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Resolusi	Tergantung ADC, biasanya 0,1–0,25°C
Tipe isolasi kabel	Fiberglass, Teflon, atau Stainless Steel
Akurasi	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ atau $\pm 0.4\%$ dari pengukuran suhu
Warna konektor	Kuning (ANSI/ASTM) atau hijau (IEC)
Penggunaan umum	Industri, laboratorium, proses suhu tinggi

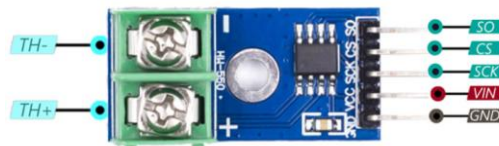
2.5.2 MAX6675

MAX6675 adalah sebuah modul konverter khusus yang dirancang untuk mengubah sinyal *analog* dari *thermocouple* tipe K menjadi data *digital* yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Modul ini memiliki ADC (*Analog to Digital Converter*) internal dengan resolusi 12-bit, sehingga mampu memberikan hasil pengukuran suhu dengan ketelitian hingga 0,25°C. Salah satu fitur penting dari MAX6675 adalah kompensasi *cold-junction* yang memungkinkan pengukuran suhu yang akurat dengan memperhitungkan suhu lingkungan sekitar sambungan dingin *thermocouple*. Modul ini mengeluarkan data suhu digital melalui antarmuka komunikasi SPI (*Serial Peripheral Interface*) yang sederhana dan cepat, sehingga memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino [19].



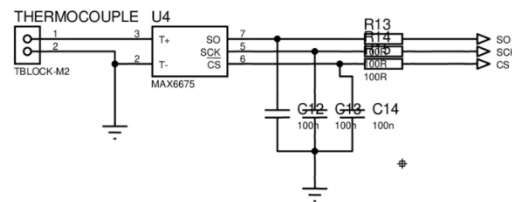
Gambar 2.5 Cara Kerja MAX6675 [22]

Pada Gambar 2.5 adalah menunjukkan koneksi termokopel tipe K dengan Arduino Uno melalui modul MAX6675. Termokopel dihubungkan ke terminal input pada modul (T+ dan T-), lalu modul mengirim data suhu ke Arduino menggunakan komunikasi SPI. Tiga pin utama yang digunakan adalah SO (data keluar) ke pin D4, CS (chip select) ke pin D5, dan SCK (clock) ke pin D6, sedangkan catu daya modul diambil dari 5V dan GND Arduino. Dengan rangkaian ini, Arduino dapat membaca nilai suhu termokopel secara digital dan menampilkannya atau memakainya untuk kontrol sistem.



Gambar 2.6 Bentuk Fisik MAX6675 [23]

Pada Gambar 2.6 adalah modul MAX6675 untuk membaca termokopel tipe K. Pada sisi kiri terdapat terminal sekrup TH+ dan TH- sebagai tempat menghubungkan dua kabel termokopel. Sisi kanan berisi pin antarmuka ke mikrokontroler, yaitu SO (data output), CS (chip select), dan SCK (clock) yang bekerja dengan komunikasi SPI, serta pin VCC/VIN untuk catu daya dan GND sebagai ground. Modul ini mengubah tegangan kecil dari termokopel menjadi data suhu digital sehingga lebih mudah diproses oleh Arduino atau mikrokontroler lainnya.



Gambar 2.7 Schematik MAX6675 [20]

Pada Gambar 2.7 adalah skematik koneksi termokopel tipe K ke IC MAX6675 sebagai pembaca suhu digital. Termokopel masuk melalui terminal TBLOCK lalu dihubungkan ke pin T+ dan T- pada MAX6675. Selanjutnya MAX6675 mengirim data suhu ke mikrokontroler melalui jalur SPI, yaitu SO (Serial Out), SCK (clock), dan CS (chip select) yang keluarannya melewati rangkaian resistor (R13) sebagai pembatas/penstabil sinyal. Kapasitor C12, C13, dan C14 dipasang sebagai filter/decoupling untuk meredam noise sehingga pembacaan suhu lebih stabil.

Berdasarkan Tabel 2.2 spesifikasi, modul pembaca termokopel ini bekerja pada tegangan 3,0–5,5 V DC dengan konsumsi arus rendah (sekitar 700 μ A dan maksimum 1,5 mA). Modul memiliki ADC 12-bit dengan resolusi 0,25°C, mampu mengukur suhu 0–1024°C dengan akurasi $\pm 3^\circ\text{C}$ pada rentang 0–700°C, serta sudah dilengkapi kompensasi cold-junction dan deteksi termokopel putus. Data suhu dikirim melalui komunikasi SPI menggunakan pin VCC, GND, SCK, CS, dan SO, dapat beroperasi pada suhu -20°C hingga $+85^\circ\text{C}$, memiliki proteksi ESD 2000 V, dan berukuran ringkas sekitar 15×25 mm.

Tabel 2.2 Spesifikasi MAX6675 [24]

Spesifikasi	Detail
Tegangan Kerja	3.0 V - 5.5 V DC
Konsumsi Arus	700 μ A (typical), maksimum 1.5 mA
Resolusi ADC	12 bit (0,25°C per langkah)
Rentang Pengukuran Suhu	0°C hingga 1024°C
Akurasi Suhu	$\pm 3^\circ\text{C}$ (0°C hingga 700°C)
Kompensasi <i>Cold-Junction</i>	Ada (internal)
Interface Komunikasi	SPI (Serial Peripheral Interface)
Deteksi Thermocouple Putus	Ada
Rentang Suhu Operasi Modul	-20°C hingga +85°C
Proteksi	ESD 2000 V
Dimensi Modul	Sekitar 15 mm x 25 mm
Pin	VCC, GND, SCK, CS, SO

2.5.3 Sensor Load Cell Half Bridge

Load cell bekerja dengan cara mengubah gaya tekan menjadi sinyal listrik. Sensor terdiri dari plat logam yang memiliki strain gauge terpasang dalam konfigurasi jembatan *Wheatstone*. Saat gaya (berat) diberikan ke plat, plat mengalami deformasi kecil yang menyebabkan perubahan resistansi pada strain gauge. Perubahan resistansi menghasilkan ketidakseimbangan

jembatan *Wheatstone* sehingga muncul sinyal listrik sangat kecil (dalam milivolt) yang proporsional dengan gaya tekan [21].

Load cell half bridge menggunakan dua *strain gauges* yang terpasang dalam konfigurasi setengah jembatan *Wheatstone*, sehingga perubahan resistansi akibat regangan diubah menjadi perubahan tegangan output yang dapat diukur. Tegangan *output* ini berbanding lurus dengan beban yang bekerja pada *load cell*, sehingga sinyal ini dapat digunakan untuk mengukur gaya atau berat secara akurat.

Rumus kalibrasi dasar untuk *load cell half bridge* adalah sebagai berikut:

$$\text{Berat (satuan)} = \frac{(\text{raw_reading} - \text{offset})}{\text{calibration_factor}} \quad (2.6)$$

Pada persamaan ini, *raw_reading* merupakan nilai pembacaan mentah dari sensor sebelum dikonversi ke satuan berat sebenarnya. Nilai ini biasanya berupa sinyal digital hasil dari konversi analog ke digital (ADC) yang masih belum memiliki arti fisik. Kemudian, *offset* adalah nilai pembacaan sensor ketika tidak ada beban yang diletakkan di atasnya, atau disebut juga sebagai *tare value*. Pengurangan antara *raw_reading* dan *offset* bertujuan untuk menghilangkan pengaruh nilai dasar sensor, sehingga hasilnya hanya merepresentasikan beban sebenarnya yang terdeteksi.

Selanjutnya, hasil selisih tersebut dibagi dengan *calibration_factor*, yaitu faktor kalibrasi yang diperoleh melalui proses kalibrasi menggunakan beban standar yang sudah diketahui massanya. Nilai *calibration_factor* ini menentukan seberapa besar perubahan nilai *raw_reading* yang mewakili satu satuan berat (misalnya gram atau kilogram). Dengan demikian, semakin akurat proses kalibrasi dilakukan, maka semakin tepat pula hasil perhitungan berat yang diperoleh dari sensor.

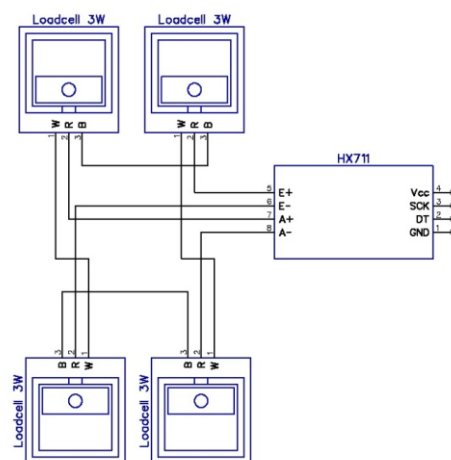
Untuk mendapatkan nilai *calibration_factor*, menggunakan rumus pada persamaan 2.7 :

$$calibration_factor = \frac{\Delta}{M} \quad (2.7)$$

Dalam rumus tersebut, Δ (delta) melambangkan perubahan nilai pembacaan mentah (*raw reading*) dari sensor saat beban diberikan dibandingkan ketika sensor tanpa beban (nilai nol atau *tare*). Sedangkan M adalah massa atau berat standar yang diketahui secara pasti dan digunakan sebagai acuan dalam proses kalibrasi.

Secara konsep, rumus ini digunakan untuk mengetahui seberapa besar perubahan sinyal keluaran sensor (Δ) yang dihasilkan akibat penambahan beban tertentu (M). Hasil pembagian antara perubahan nilai keluaran sensor dan massa beban standar inilah yang disebut *calibration factor*. Nilai ini menunjukkan seberapa sensitif sensor terhadap perubahan beban, atau dengan kata lain, berapa besar perubahan pembacaan mentah yang setara dengan satu satuan berat (misalnya 1 gram atau 1 kilogram).

Dengan mengetahui nilai *calibration_factor*, sistem dapat mengonversi data digital mentah dari sensor menjadi nilai berat sebenarnya secara akurat. Proses ini merupakan langkah penting dalam pengukuran berbasis sensor karena memastikan bahwa hasil pembacaan yang ditampilkan sudah sesuai dengan satuan fisik yang diinginkan dan tidak dipengaruhi oleh karakteristik individual sensor atau rangkaian penguat yang digunakan.



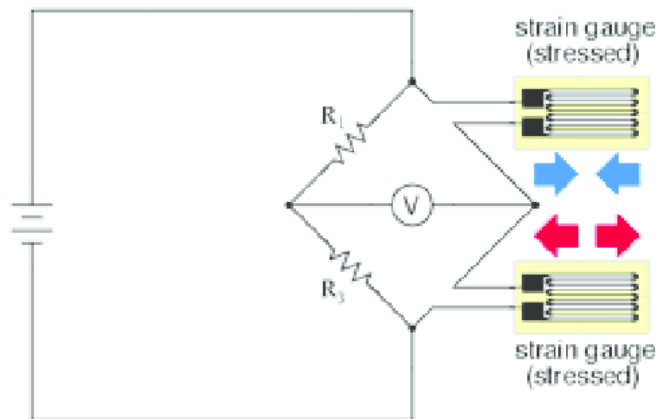
Gambar 2.4 Cara Kerja Sensor Load Cell Plat [26]

Pada Gambar 2.6 adalah menunjukkan rangkaian 4 load cell 3-kabel yang disusun menjadi satu jembatan (seperti Wheatstone bridge) untuk dibaca oleh modul HX711. Keempat load cell dihubungkan sehingga menghasilkan sinyal diferensial pada keluaran A+ dan A-, sementara catu eksitasi jembatan diberikan melalui pin E+ dan E- pada HX711. Modul HX711 kemudian memperkuat dan mengubah sinyal analog kecil dari load cell menjadi data digital, yang dikirim ke mikrokontroler melalui pin DT (data) dan SCK (clock), dengan VCC dan GND sebagai sumber dayanya



Gambar 2.5 Bentuk Fisik Sensor Load Cell Plat [26]

Pada Gambar 2.7 menunjukkan load cell tipe kecil (sering disebut *micro load cell*) yang digunakan untuk mengukur gaya atau berat. Komponen ini bekerja dengan prinsip *strain gauge*, yaitu perubahan resistansi ketika pelat logam mengalami tekukan akibat beban. Kabel keluaran (umumnya merah–hitam–putih) dihubungkan ke rangkaian penguat/ADC seperti HX711 agar sinyalnya dapat dibaca oleh mikrokontroler. Load cell jenis ini banyak dipakai pada timbangan digital, alat ukur massa, dan sistem penakaran otomatis karena ukurannya ringkas dan cukup sensitif.



Gambar 2.8 Schematik Sensor Load Cell Plat [22]

Pada Gambar 2.8 menggambarkan prinsip *load cell/strain gauge* yang disusun dalam rangkaian jembatan *Wheatstone*. Saat beban diberikan, salah satu *strain gauge* mengalami tarik (*tension*) dan yang lain mengalami tekan (*compression*) sehingga nilai resistansinya berubah. Perubahan resistansi ini membuat jembatan menjadi tidak seimbang dan menghasilkan tegangan keluaran (V) yang besarnya sebanding dengan beban. Tegangan kecil tersebut kemudian biasanya diperkuat dan dikonversi menjadi data digital oleh modul seperti HX711 agar dapat dibaca oleh mikrokontroler.

Berdasarkan tabel 2.3 spesifikasi, load cell ini memiliki kapasitas beban maksimal 50 kg dengan tegangan masukan 5–12 V DC. Sensor menghasilkan sinyal keluaran kecil sebesar $2 \pm 0,2 \text{ mV/V}$ dengan resistansi input $405 \pm 10 \Omega$ dan resistansi output $350 \pm 3 \Omega$, sehingga umumnya memerlukan penguat/ADC seperti HX711 untuk pembacaan. Load cell dapat bekerja pada suhu -20°C hingga 60°C , memiliki batas overload hingga 150% dari kapasitas maksimum, serta insulasi yang baik dengan resistansi $\geq 2000 \text{ M}\Omega$ pada 50 V DC.

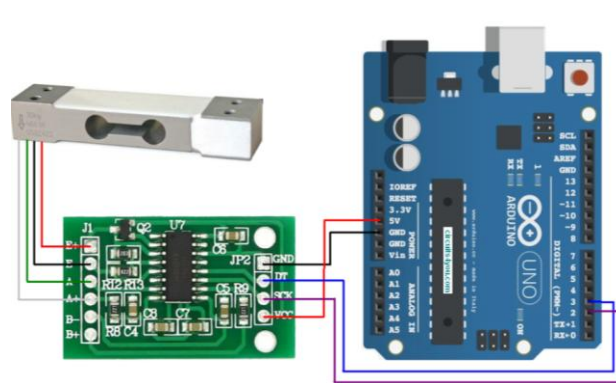
Tabel 2.3 Spesifikasi Load Cell Plat [27]

Spesifikasi	Detail
Kapasitas Beban Maksimal	50 kg
Tegangan Masukan	5-12 V DC
Tegangan Keluaran	$2 \pm 0,2$ mV/V
Resistansi <i>Input</i>	$405 \pm 10 \Omega$
Resistansi <i>Output</i>	$350 \pm 3 \Omega$
Rentang Suhu Operasi	-20°C hingga 60°C
<i>Overload</i>	150% dari kapasitas maksimal
Insulasi Resistansi	$\geq 2000 \text{ M}\Omega$ pada 50 V DC

2.5.4 HX711

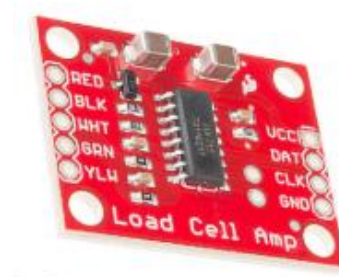
HX711 adalah modul penguat dan ADC (*Analog-to-Digital Converter*) 24-bit yang dirancang khusus untuk menguatkan dan mengubah sinyal dari load cell ke data digital. Modul ini memiliki dua saluran *input* (Channel A dan B) yang dapat digunakan untuk mengukur beban dengan sensitivitas berbeda. HX711 sangat populer dalam sistem timbangan digital dan aplikasi pengukuran berat karena memiliki penguatan otomatis dan *sensitivity* yang tinggi [23].

Cara kerja HX711 dimulai dengan menerima sinyal *analog* dari *load cell* yang berupa perubahan resistansi akibat tekanan beban. Sinyal ini masuk ke *input* modul dan diperkuat secara internal hingga *gain* 128 atau 64 kali tergantung konfigurasi. Selanjutnya, sinyal yang telah diperkuat dikonversi oleh ADC internal 24-bit menjadi data *digital* yang presisi. Data ini dikirim serial menggunakan dua pin utama, yakni Data (DT) dan *Clock* (SCK), ke mikrokontroler sebagai representasi nilai berat yang sedang diukur. Dengan sensitivitas tinggi, HX711 memungkinkan pembacaan beban yang sangat kecil sekalipun dengan akurasi tinggi [24].



Gambar 2.9 Cara Kerja HX711[30]

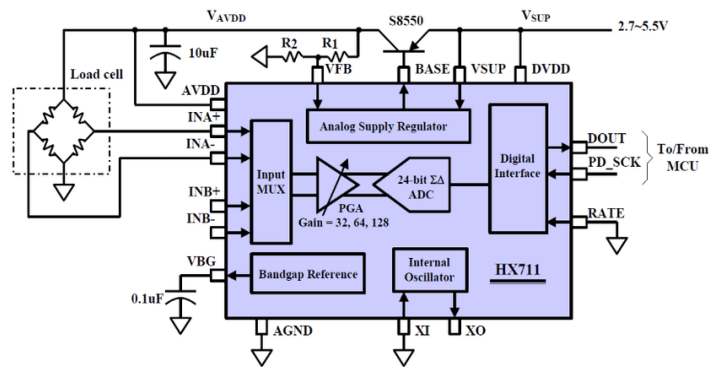
Pada Gambar 2.9 memperlihatkan rangkaian pengukuran berat menggunakan load cell yang dihubungkan ke modul HX711 lalu dibaca oleh Arduino Uno. Empat kabel load cell (E+/E- sebagai eksitasi dan A+/A- sebagai sinyal) masuk ke terminal HX711, kemudian HX711 mengirim data digital ke Arduino melalui dua pin, yaitu DT (data) dan SCK (clock), sementara catu daya modul diambil dari 5V dan GND Arduino. Dengan konfigurasi ini, sinyal kecil dari load cell dapat diperkuat dan dikonversi menjadi data yang siap diproses Arduino untuk menampilkan atau mengontrol sistem berdasarkan berat.



Gambar 2.10 Bentuk Fisik HX711[30]

Pada Gambar 2.10 merupakan modul Load Cell Amplifier HX711, yaitu rangkaian penguat dan konverter ADC yang digunakan untuk membaca sinyal dari load cell. Di sisi input terdapat pin untuk kabel load cell (misalnya RED, BLK, WHT, GRN/YLW) yang terhubung ke jembatan strain gauge, sedangkan di sisi output tersedia pin VCC, GND, DAT (DT), dan CLK (SCK) untuk komunikasi ke mikrokontroler seperti Arduino. Modul ini berfungsi

memperkuat sinyal mV yang sangat kecil dari load cell lalu mengubahnya menjadi data digital sehingga pengukuran berat menjadi lebih akurat dan mudah diproses.



Gambar 2.11 Schematik HX711[30]

Pada Gambar 2.11 merupakan diagram blok IC HX711 yang menunjukkan cara kerja pembacaan load cell. Sinyal analog sangat kecil dari jembatan load cell (Wheatstone bridge) masuk melalui pin diferensial INA+/INA- atau INB+/INB-, kemudian dipilih oleh input MUX dan diperkuat oleh PGA dengan pilihan gain 32, 64, atau 128. Setelah itu sinyal dikonversi oleh ADC sigma-delta 24-bit sehingga menghasilkan data digital beresolusi tinggi. Data keluaran dikirim ke mikrokontroler melalui antarmuka digital DOUT dan PD_SCK, sementara pin RATE mengatur laju sampling, dan bagian regulator, referensi bandgap, serta osilator internal menjaga catu daya dan kestabilan pengukuran.

Berdasarkan tabel 2.4 spesifikasi, modul HX711 memiliki ADC 24-bit dengan pilihan gain 32, 64, dan 128 pada Channel A serta gain 32 pada Channel B, sehingga mampu membaca sinyal kecil dari load cell dengan lebih presisi. Modul ini bekerja pada tegangan 2,7–5,5 V dengan konsumsi daya sekitar 1,5 mA, serta mengirim data ke mikrokontroler melalui antarmuka serial dua pin yaitu DT dan SCK. Kecepatan sampling dapat diatur pada kisaran 10–80 sampel per detik, dilengkapi fitur deteksi load cell putus, dan berukuran ringkas sekitar 15 × 17 mm.

Tabel 2.4 Spesifikasi HX711[30]

Spesifikasi	Detail
Resolusi ADC	24-bit
<i>Gain</i> (Penguatan)	32, 64, 128 (Channel A), 32 (Channel B)
Tegangan Operasi	2.7V - 5.5V
Konsumsi Daya	Sekitar 1.5 mA
<i>Interface</i>	Serial (DT dan SCK)
Kecepatan <i>Sampling</i>	10-80 <i>samples per second</i>
Deteksi <i>Load Cell</i> Putus	Ada
Ukuran Modul	Sekitar 15 x 17 mm

2.6 Sistem Power Supply

2.6.1 Switched Mode Power Supply (SMPS)

SMPS 12V adalah jenis catu daya *switching* yang menghasilkan *output* tegangan DC sebesar 12 volt. *Power supply* ini banyak digunakan untuk mengalirkan daya ke berbagai perangkat elektronik seperti LED strip, CCTV, mikrokontroler, dan peralatan lain yang membutuhkan tegangan stabil 12V dengan variasi arus yang tersedia sesuai kebutuhan, misalnya 3A, 5A, hingga 20A. SMPS 12V bekerja dengan efisiensi tinggi, mengubah *input* AC dari listrik PLN (100-240V) menjadi tegangan DC 12V melalui proses *switching* frekuensi tinggi, yang membuatnya memiliki ukuran kecil dan lebih ringan dibanding *power supply* trafo konvensional [25].

sebagai umpan balik (feedback) agar tegangan output tetap stabil meskipun beban berubah. Di sisi output, dioda cepat dan kapasitor filter merapikan tegangan menjadi 12V DC yang siap digunakan, sementara komponen proteksi dan filter membantu mengurangi noise serta meningkatkan keamanan operasi.

Tabel 2.5 Spesifikasi Switched Mode Power Supply

Spesifikasi	Detail
Tegangan <i>Input</i> AC	100 - 240 V AC
Tegangan <i>Output</i> DC	12 V DC
Arus <i>Output</i>	10A
Daya <i>Output</i>	120 Watt
Frekuensi <i>Switching</i>	Sekitar 50-100 kHz
Efisiensi	Sekitar 85% - 90%
Proteksi	<i>Over voltage, short circuit, over current</i>
Dimensi	Variatif, biasanya ringkas
Suhu Operasional	-10°C hingga 50°C

2.6.2 Step Down *LM2596*

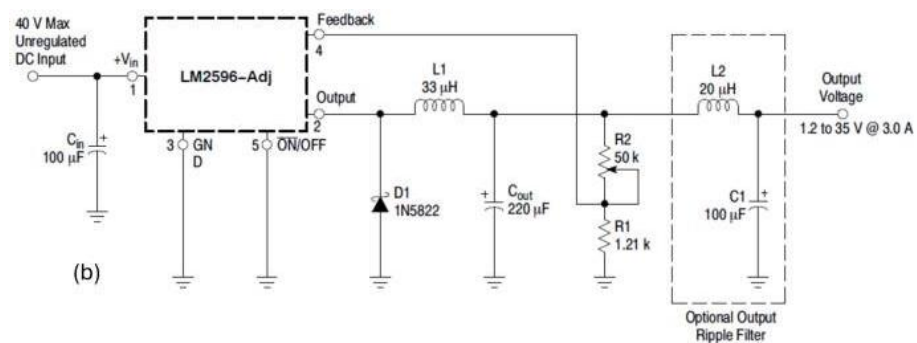
LM2596 adalah modul *step-down (buck)* DC-DC converter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan *input* DC yang lebih tinggi menjadi tegangan *output* DC yang lebih rendah dan stabil sesuai kebutuhan aplikasi [26]. Modul ini menggunakan IC LM2596 yang dapat bekerja pada rentang *input* 3V hingga 40V dan menghasilkan *output* yang dapat diatur antara 1,23V hingga 37V dengan arus *output* hingga 3A (maksimal 2A tanpa pendingin tambahan)

[27]. Modul ini memiliki efisiensi tinggi sekitar 92%, sehingga cocok digunakan untuk berbagai proyek elektronik yang membutuhkan suplai tegangan stabil seperti pengisian daya, *power supply* untuk LED, motor DC, atau beban lain yang memerlukan tegangan rendah dari sumber yang lebih tinggi [28].



Gambar 2.14 Bentuk Fisik LM2596[33]

Pada Gambar 2.14 merupakan DC-DC *step-down* (buck converter), umumnya berbasis IC seperti LM2596, yang berfungsi menurunkan tegangan DC menjadi tegangan yang lebih rendah dan stabil. Tegangan masuk dihubungkan ke terminal IN+ dan IN-, kemudian keluarannya diambil pada OUT+ dan OUT- dengan nilai tegangan yang bisa diatur melalui trimpot (potensiometer biru). Komponen induktor dan kapasitor pada modul berperan menyaring ripple sehingga output lebih halus, sehingga modul ini sering dipakai untuk menyuplai Arduino, sensor, atau rangkaian kontrol dari sumber 12V/24V.



Gambar 2.15 Schematik LM2596[33]

Pada Gambar 2.15 merupakan rangkaian aplikasi LM2596-Adj sebagai konverter DC-DC *step-down (buck)* untuk menurunkan tegangan DC yang tidak teregulasi (hingga sekitar 40 V) menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah dan stabil. Tegangan masuk disaring oleh kapasitor C_{in} , lalu LM2596 melakukan switching ke induktor L1 dan dioda Schottky 1N5822 untuk membentuk tegangan DC hasil penyearahan switching. Tegangan output dirapikan oleh kapasitor C_{out} , sedangkan nilai tegangan keluaran diatur melalui rangkaian feedback pembagi tegangan R1–R2. Pada bagian akhir dapat ditambahkan filter ripple opsional (L2 dan C1) untuk mengurangi riak sehingga output lebih halus, dengan kemampuan arus keluaran hingga sekitar 3 A (tergantung desain dan pendinginan).

Tabel 2.6 Spesifikasi LM2596[33]

Spesifikasi	Detail
Tegangan Input DC	3 V – 40 V
Tegangan Output DC	1,23 V – 37 V (adjustable)
Arus Output Maksimal	3 A (2 A tanpa heatsink)
Efisiensi	Sekitar 92%
Frekuensi Switching	150 kHz
Dimensi Modul	Sekitar 43 x 24 x 14 mm
Proteksi	Proteksi termal dan <i>current limit</i>
Pengaturan <i>Output</i>	Potensiometer <i>variabel</i>
Paket IC	TO-220, TO-263

2.7 Sistem Mikrokontroller

2.7.1 ATMEGA328P

ATmega328P adalah mikrokontroler 8-bit berbasis arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) yang dikembangkan oleh Atmel. Mikrokontroler ini sangat populer dan banyak digunakan di berbagai proyek *embedded system* dan hobi, terutama sebagai inti dari papan pengembangan Arduino Uno. ATmega328P memiliki kemampuan eksekusi instruksi yang cepat, dengan sekitar 1 instruksi per siklus *clock*, sehingga efisien dalam proses komputasi.

Mikrokontroler ini memiliki memori Flash sebesar 32 KB untuk penyimpanan program, SRAM 2 KB untuk data sementara, dan EEPROM 1 KB untuk penyimpanan data *non-volatile*. ATmega328P bekerja dengan tegangan operasi antara 1,8 hingga 5,5 Volt dan kecepatan *clock* hingga 20 MHz, meskipun biasanya pada Arduino digunakan pada 16 MHz. Selain itu, mikrokontroler ini menyediakan 23 pin *input/output digital*, termasuk 6 pin yang dapat menghasilkan sinyal PWM dan 6 pin *input analog* untuk pembacaan sensor.



Gambar 2.16 Bentuk Fisik Arduino Uno ATMEGA328P

Pada Gambar 2.16 merupakan bentuk fisik dari Arduino Uno ATmega328P

Tabel 2.7 Spesifikasi Arduino Uno ATMEGA328P

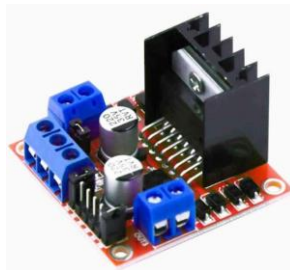
Spesifikasi	Detail
Arsitektur	8-bit AVR RISC
Flash Memory	32 KB (0,5 KB untuk bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Tegangan Operasi	1.8 V – 5.5 V
Kecepatan <i>Clock</i>	
Maksimal	20 MHz (umum 16 MHz pada Arduino)
Pin Input/Output	23 Pin (14 dapat dipergunakan sebagai I/O
Digital	umum)
Pin PWM	6 Pin
Pin Analog <i>Input</i>	6 Pin
Antarmuka	
Komunikasi	SPI, I2C (TWI), UART
Paket	28-pin DIP / SMD

2.8 Sistem Output

2.8.1 Driver LN298N

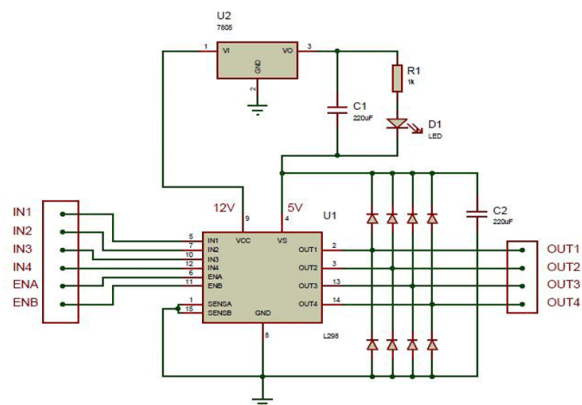
Driver motor L298N adalah modul yang menggunakan IC L298N tipe *dual H-Bridge* untuk mengendalikan dua motor DC secara mandiri atau satu motor stepper. Modul ini berfungsi untuk mengatur kecepatan sekaligus arah putaran motor dengan memberikan sinyal PWM dan logika *digital*. L298N

mampu menangani beban induktif seperti motor dengan tegangan operasi antara 5 hingga 35 Volt dan arus maksimum keluaran 2 Ampere per channel [29]. Modul ini umum dipakai dalam proyek robotik dan otomasi karena kemudahan integrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino, serta memiliki pin out yang rapi dan lengkap untuk *input* kontrol, *output* motor, dan pengaturan *enable* [30]. Pin *enable* (ENA dan ENB) dapat dihubungkan langsung agar motor berputar penuh atau dikontrol dengan sinyal PWM untuk pengaturan kecepatan. Pin input menerima sinyal logika *HIGH/LOW* untuk menentukan arah putaran. Modul ini juga memiliki proteksi untuk beban induktif dan mudah dipakai karena menyediakan regulator *internal* untuk catu daya logika [31].



Gambar 2.17 Bentuk Fisik Driver L298N[38]

Pada Gambar 2.17 merupakan modul driver motor DC L298N yang berfungsi mengendalikan arah putar dan kecepatan motor melalui rangkaian H-bridge. Modul ini memiliki terminal keluaran untuk motor (OUT), terminal catu daya motor dan logika, serta pin kontrol dari mikrokontroler seperti IN1–IN4 untuk arah putaran dan ENA/ENB untuk kontrol kecepatan menggunakan sinyal PWM. Heatsink hitam dipasang untuk membantu pembuangan panas karena IC L298N dapat bekerja pada arus cukup besar, sehingga modul ini umum digunakan pada robot, konveyor kecil, atau sistem penggerak seperti agitator.



Gambar 2.18 skematik Driver L298N[38]

Pada Gambar 2.18 merupakan skematik rangkaian driver motor L298 yang digunakan untuk mengendalikan motor DC melalui konfigurasi dual H-bridge. Sinyal kontrol dari mikrokontroler masuk ke pin IN1–IN4 untuk menentukan arah putaran, sedangkan ENA dan ENB dapat diberi sinyal PWM untuk mengatur kecepatan. Catu daya motor diberikan dari 12V, lalu regulator 7805 menurunkan tegangan menjadi 5V untuk logika driver. Pada sisi keluaran, pin OUT1–OUT4 terhubung ke motor, dilengkapi dioda flyback dan kapasitor sebagai proteksi dari lonjakan tegangan balik (back-EMF) agar rangkaian lebih aman dan stabil saat motor berputar.

Berdasarkan Tabel 2.8 spesifikasi, modul driver motor ini menggunakan IC L298N dual H-bridge yang mampu mengendalikan 2 motor DC atau 1 motor stepper. Tegangan motor yang didukung berada pada kisaran 5–35 V, sedangkan tegangan logikanya 5 V (dapat memanfaatkan regulator internal), dengan arus maksimum sekitar 2 A per output dan daya hingga 25 W. Kontrol dilakukan melalui sinyal digital HIGH/LOW serta PWM untuk pengaturan kecepatan, menggunakan pin ENA, IN1, IN2 untuk Motor A dan ENB, IN3, IN4 untuk Motor B, dengan keluaran motor di OUT1–OUT4 serta koneksi daya VCC dan GND. Modul ini juga umumnya memiliki proteksi terhadap beban induktif dan panas berlebih, bergantung pada penerapan dan pendinginannya.

Tabel 2.8 Spesifikasi Driver L298N[38]

Spesifikasi	Rincian
IC Utama	L298N <i>Dual H-Bridge Driver</i>
Tegangan Operasi Motor	5 V - 35 V
Tegangan Operasi Logika	5 V (dapat menggunakan regulator internal)
Arus Maksimal per <i>Output</i>	2 A
Daya Maksimal	25 W
Jumlah Motor Yang Dikontrol	2 Motor DC atau 1 Motor Stepper
Input Kontrol	Digital <i>HIGH/LOW</i> $\pm$ PWM (untuk kecepatan)
Proteksi	Beban induktif, <i>short circuit</i> , <i>thermal shutdown</i> (tergantung penggunaan)
<i>Interface Pin</i>	ENA, IN1, IN2 untuk Motor A; ENB, IN3, IN4 untuk Motor B; <i>Output</i> motor (OUT1-OUT4), VCC, GND

2.8.2 Motor DC

Motor DC FAPG36-555 adalah motor penggerak dengan roda gigi planetari (*planetary gear motor*) yang memiliki ukuran kompak dengan diameter motor sekitar 36 mm dan panjang *gear box* tambahan. Motor ini berbasis motor DC brushed tipe 555, yang dikenal mempunyai torsi tinggi dan efisiensi yang baik pada tenaga kecil hingga sedang [32]. Motor ini cocok untuk aplikasi yang memerlukan output tenaga besar tetapi dengan ukuran

fisik yang kecil, seperti robotika, perangkat industri kecil, dan peralatan elektronik yang memerlukan kendali gerak presisi.

Roda gigi planetari yang disematkan pada motor ini memberikan keuntungan pengurangan kecepatan dan peningkatan torsi sekaligus memberikan *output shaft* dengan stabilitas lebih baik dan umur lebih panjang dibanding gear motor biasa. Motor ini umumnya digunakan pada tegangan sekitar 12V hingga 24V DC dengan variasi kecepatan yang bisa disesuaikan tergantung kebutuhan [32].



Gambar 2.19 Bentuk Fisik Motor DC FAPG-555[39]

Pada gambar 2.19 merupakan motor DC gearbox (motor DC yang dilengkapi reduksi gigi) yang menghasilkan torsi lebih besar dengan putaran lebih rendah dibanding motor DC biasa. Motor jenis ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan tenaga dorong kuat dan kecepatan stabil, misalnya penggerak agitator atau mekanisme pemutar. Umumnya motor gearbox dapat dikendalikan menggunakan driver seperti L298N untuk mengatur arah putaran dan kecepatan melalui sinyal PWM, sementara poros keluaran (shaft) digunakan untuk menghubungkan ke beban mekanik seperti roda gigi, pulley, atau kopling pengaduk.

Tabel 2.9 Spesifikasi Motor DC FAPG-555[39]

Spesifikasi	Detail
Tipe Motor	DC <i>Brushed</i> dengan <i>Planetary Gearbox</i>
Diameter Motor	36 mm
Panjang <i>Gearbox</i>	Sekitar 20–25 mm (tergantung tipe)
Tegangan Operasi	12V – 24V DC
Arus Operasi Maksimal	Sekitar 2,2 A
<i>Output Shaft</i> Diameter	Sekitar 8 mm
Kecepatan <i>Output</i>	Variabel, biasanya 43 – 462 RPM
Torsi <i>Output</i>	Tinggi (bergantung rasio gear)

2.8.3 *Centrifugal CKE MC-DE/M100R/1-NO*

Centrifugal CKE MC-DE/M100R/1-NO adalah kipas blower jenis centrifugal yang biasa digunakan untuk membantu sirkulasi udara dalam berbagai aplikasi seperti ventilasi, *exhaust*, dan pendinginan di dapur restoran, hotel, pabrik, dan industri lainnya [33]. Kipas ini dirancang dengan konstruksi yang kokoh dan motor berkawat tembaga untuk performa yang stabil dan umur panjang. Blower centrifugal ini menghisap udara dari sisi *inlet* (masuk) dan menghembuskannya kuat melalui *outlet* (keluar) dengan tekanan yang lebih tinggi dibandingkan kipas aksial biasa, sehingga efektif untuk pembuangan udara dengan tahanan saluran yang lebih besar.



Gambar 2.20 Bentuk Fisik Centrifugal CKE MC-DE/M100R/1-NO[41]

Pada gambar 2.15 merupakan blower sentrifugal (blower keong) yang berfungsi menghasilkan aliran udara bertekanan untuk proses ventilasi atau pendinginan. Udara masuk melalui bagian tengah (inlet), lalu didorong oleh impeller dan dikeluarkan melalui saluran samping (outlet) sehingga aliran udara lebih terarah dibanding kipas biasa. Blower jenis ini sering digunakan pada sistem pendingin, pengering, atau sirkulasi udara karena mampu memberikan hembusan yang kuat dan stabil untuk membantu mempercepat pelepasan panas.

Berdasarkan Tabel 2.10 spesifikasi, blower sentrifugal MC-DE/M100R/1-NO memiliki diameter inlet dan outlet 7 cm dengan daya 40 Watt dan bekerja pada tegangan 220V AC. Blower ini berputar hingga 2800 RPM dengan kapasitas aliran udara sekitar 240–280 CMH dan tekanan 125–136 Pascal, serta mengonsumsi arus sekitar 0,16 A. Tingkat kebisingannya sekitar 57 dB, berdimensi $20 \times 19 \times 19$ cm, berat 2,1 kg, dan mampu beroperasi pada suhu maksimal hingga 80°C .

Tabel 2.10 Spesifikasi Centrifugal CKE MC-DE/M100R/1-NO[41]

Spesifikasi	Detail
Model	MC-DE/M100R/1-NO
Diameter <i>Inlet</i>	7 cm
Diameter <i>Outlet</i>	7 cm
Daya	40 Watt
Tegangan	220 Volt AC
Kecepatan Putar	2800 RPM
Volume Udara	240 - 280 CMH
Tekanan	136 - 125 Pascal
Arus	0,16 Ampere
Tingkat Kebisingan	57 dB
Dimensi (WxLxH)	20 x 19 x 19 cm
Berat	2,1 kg
Suhu Operasi Maksimal	Max 80°C

2.8.4 LCD I2C Blue 16x2

LCD I2C 16x2 adalah modul display karakter berbasis *Liquid Crystal Display* (LCD) yang dapat menampilkan 16 karakter untuk setiap baris dengan dua baris total, sehingga mampu menampilkan hingga 32 karakter [34]. Modul ini menggunakan interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*) yang

memungkinkan komunikasi data dengan mikrokontroler hanya melalui dua pin, yaitu SDA (data) dan SCL (*clock*), yang membuat pengkabelan menjadi sederhana dan rapi dibandingkan menggunakan 16 pin pada LCD standar [35].

LCD 16x2 secara fisik terdiri dari matriks titik (*dot matrix*) yang membentuk karakter atau simbol yang ditampilkan. Modul I2C pada LCD ini dilengkapi chip pengontrol yang mengkonversi sinyal I2C menjadi sinyal paralel yang dapat dimengerti oleh LCD. Biasanya juga terdapat potensiometer untuk mengatur kontras serta pengaturan lampu latar (*backlight*) agar tampilan mudah dibaca dalam berbagai kondisi cahaya. Modul ini sangat populer digunakan dalam proyek mikrokontroler seperti Arduino, Raspberry Pi, maupun perangkat *embedded* lain untuk menampilkan informasi seperti teks, data sensor, status, dan instruksi [36].



Gambar 2.21 Bentuk Fisik LCD I2C 16x2[45]

Pada gambar 2.21 merupakan LCD karakter 16×2 yang dilengkapi modul antarmuka I2C (biasanya berbasis PCF8574). LCD ini digunakan untuk menampilkan informasi sederhana seperti suhu, berat, status alat, atau menu pengaturan. Dengan modul I2C, jumlah kabel ke mikrokontroler menjadi lebih sedikit karena cukup memakai VCC, GND, SDA, dan SCL, sehingga rangkaian lebih rapi dan hemat pin Arduino dibanding koneksi paralel biasa. Selain itu, trimpot biru pada modul berfungsi untuk mengatur kontras tampilan agar tulisan terlihat jelas.

Tabel 2.11 Spesifikasi LCD I2C[45]

Spesifikasi	Detail
<i>Tipe Display</i>	LCD karakter 16 kolom x 2 baris
<i>Interface</i>	I2C (SDA, SCL)
Tegangan Operasi	5 Volt DC
Alamat I2C	0x27 atau 0x3F (dipilih melalui jumper)
Ukuran Modul	Sekitar 80 mm x 36 mm x 12 mm
Tegangan <i>Backlight</i>	5 Volt DC (dapat diatur)
Jumlah Karakter	32 karakter (16 per baris)
Library Dukungan	LiquidCrystal_I2C (Arduino), lain-lain
Fitur Tambahan	Pengaturan kontras via potensiometer
Pin Koneksi	VCC, GND, SDA, SCL

2.8.5 Sistem Agitator

Sistem agitator merupakan sebuah mekanisme pengaduk otomatis yang dirancang untuk mempercepat proses pendinginan biji kopi setelah proses roasting. Pada sistem ini, motor penggerak akan memutar baling-baling atau lengan pengaduk sehingga biji kopi yang masih panas terus bergerak dan tidak saling menumpuk. Gerakan ini memungkinkan udara bersirkulasi lebih merata di seluruh permukaan biji, sehingga panas dapat dilepaskan dengan jauh lebih efisien dibandingkan metode pendinginan manual. Selain itu, agitator membantu mencegah terjadinya *heat pocket* atau area yang tetap panas karena biji tidak bergerak. Dengan adanya agitasi yang konstan,

temperatur biji kopi dapat turun secara seragam, menjaga kualitas dan mencegah terjadinya *over-roasting* akibat panas tersisa.

Dibandingkan dengan pendinginan manual yang mengandalkan adukan tangan atau kipas tanpa pengaturan yang konsisten, sistem agitator memberikan kecepatan dan stabilitas yang jauh lebih baik. Rotasi motor yang diatur menggunakan PWM memastikan kecepatan pengadukan tetap stabil sesuai beban pada hopper, sehingga performa pendinginan dapat diprediksi dan diulang dengan hasil yang sama. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan sistem agitator mampu mempercepat pendinginan hingga 40–50% lebih cepat dibandingkan metode manual. Dengan efisiensi waktu tersebut, sistem agitator tidak hanya meningkatkan kualitas hasil roasting, tetapi juga meningkatkan efisiensi kerja, terutama ketika digunakan untuk batch roasting dalam jumlah besar.

Agitator dayung adalah salah satu jenis pengaduk mekanis yang digunakan dalam proses pencampuran atau agitasi berbagai bahan dalam tangki atau bejana [37]. Agitator ini memiliki bilah berbentuk dayung (*paddle*) yang dipasang pada poros dan berputar dengan kecepatan rendah hingga sedang, biasanya antara 20 hingga 200 RPM. Dayung agitator umumnya berbentuk datar dengan dua hingga empat bilah dan sering digunakan untuk mencampur bahan yang bersifat kental atau untuk proses yang membutuhkan pencampuran lembut tanpa menghasilkan turbulensi tinggi [38].

Prinsip kerja agitator dayung adalah mendorong bahan cair atau semi-cair secara *radial* dan *tangensial*, yaitu menggerakkan zat cair ke samping dan keluar dari bilah dayung, sehingga terjadi pencampuran yang *homogen* [39]. Aliran yang dihasilkan oleh agitator dayung cenderung tidak menghasilkan arus *vertikal (aksial)* kecuali jika bilah dayung dimiringkan. Dalam aplikasi industri, agitator dayung digunakan untuk mencampur bahan kimia, pasta, cat, bahan perekat, kosmetik, dan sejenisnya di mana kecepatan tinggi bukan prioritas utama [40].



Gambar 2.6 Bentuk Fisik Agitator Dayung

Pada gambar 2.17 menunjukkan proses pengadukan biji kopi di dalam wadah pendingin menggunakan agitator berbentuk paddle/sekop yang berputar. Pengaduk ini berfungsi meratakan sebaran biji kopi dan terus membalik biji agar panas cepat terlepas dan pendinginan berlangsung lebih merata. Bagian dasar yang berlubang membantu sirkulasi udara sehingga panas dapat keluar lebih efektif, sedangkan poros di tengah menjadi titik putar pengaduk untuk menjaga pergerakan biji tetap stabil selama proses cooling.

Tabel 2.12 Spesifikasi Agitator Dayung[50]

Spesifikasi	Detail
Jenis Pengaduk	Dayung (<i>Paddle</i>)
Jumlah Bilah	2 - 4 bilah
Bentuk Bilah	Datar
Kecepatan Putar	20 - 200 RPM
Panjang Bilah	50% - 80% dari diameter bejana
Lebar Bilah	10% - 25% dari panjang bilah

2.9 Regresi Linier

Regresi linier adalah metode statistik yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis hubungan *linier* antara satu variabel dependen (*respon*) dengan satu atau lebih variabel independen (*prediktor*). Tujuan utama *regresi linier* adalah untuk menemukan persamaan garis lurus yang paling sesuai dengan data pengamatan sehingga dapat digunakan untuk memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan nilai variabel independen.

Persamaan regresi linier sederhana dengan satu variabel independen dapat dituliskan pada persamaan 2.8 :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (2.8)$$

dimana:

- Y adalah variabel dependen (*respon*),
- X adalah variabel independen (*prediktor*),
- β_0 adalah *intercept* (nilai Y saat $X = 0$),
- β_1 adalah *slope* (kemiringan garis, yang menunjukkan perubahan rata-rata Y untuk setiap satu perubahan unit X),
- ϵ adalah *error term* atau galat yang menunjukkan deviasi nilai sebenarnya dari nilai yang diprediksi.

Metode *regresi linier* menggunakan pendekatan kuadrat terkecil (*least squares*) untuk mencari nilai β_0 dan β_1 yang meminimalkan jumlah kuadrat dari selisih antara nilai pengamatan (aktual) dan nilai prediksi oleh model. Dengan model ini, *regresi linier* tidak hanya memprediksi nilai, tetapi juga membantu memahami seberapa kuat hubungan antara variabel X dan Y serta mengukur pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen.

$$Y = a + bX \quad (2.9)$$

dimana:

- Y adalah variabel dependen (hasil/output),
- X adalah variabel independen (input),
- a adalah *intercept* (titik potong Y Ketika $X = 0$)

- b adalah *slope*/kemiringan garis regresi

Selain prediksi, *regresi linier* digunakan dalam banyak bidang seperti ekonomi, teknik, ilmu sosial, dan ilmu alam untuk analisis hubungan sebab-akibat dan pengambilan keputusan berbasis data. Kelebihan *regresi linier* adalah kesederhanaan model serta interpretasi hasil yang mudah, meskipun hanya cocok untuk hubungan yang bersifat *linier* dan memerlukan asumsi tertentu seperti *normalitas residual* dan *homogenitas varians*. *Regresi linier* adalah alat analisis statistik fundamental yang menghubungkan variabel-variabel melalui fungsi *linear*, memberikan wawasan kuantitatif dan prediktif dari data *observasi*.

2.10 Efisiensi

Efisiensi waktu merupakan ukuran untuk menunjukkan seberapa besar penghematan durasi proses yang diperoleh suatu metode dibandingkan metode acuan (baseline) untuk menghasilkan keluaran akhir yang sama. Pada penelitian ini, metode acuan adalah pendinginan manual, sedangkan metode pembanding adalah pendinginan menggunakan agitator otomatis. Konsepnya adalah menghitung selisih waktu antara kedua metode sebagai “waktu yang dihemat”, kemudian menormalisasikannya terhadap waktu metode acuan agar hasilnya bersifat relatif dan dapat dibandingkan pada berbagai variasi beban. Nilai efisiensi dinyatakan dalam persen sehingga mudah diinterpretasikan; semakin besar persentase efisiensi, semakin besar penghematan waktu yang dicapai metode agitator otomatis dibanding pendinginan manual pada kondisi pengujian yang sama.

$$\text{Efisiensi waktu (\%)} = \frac{T_{\text{Manual}} - T_{\text{Otomatis}}}{T_{\text{Manual}}} \times 100\% \quad (3.0)$$