

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan melalui jurnal dan penelitian terdahulu, diperoleh beberapa penelitian yang memiliki keterkaitan dengan sistem monitoring massa, susut bobot, dan kontrol kelembapan pada alat pengering. Penelitian-penelitian tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan metode serta pengembangan sistem pada penelitian ini. Ringkasan penelitian terdahulu ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka

No.	Judul Penelitian	Keterangan	Target Perbaikan
1	<i>Pengaruh Temperatur Pengeringan pada Alat Pengering Sistem Rotary terhadap Kualitas Cabai Merah — Pratama dkk.</i>	Pratama dkk. melakukan pengeringan cabai pada temperatur 60°C, 70°C, dan 80°C. Pada temperatur 70°C diperoleh susut bobot sebesar 87,2% dengan kadar air akhir 11,22% dan warna cabai masih tetap merah [1].	Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh temperatur terhadap hasil pengeringan. Pada penelitian ini, nilai susut bobot 87,2% digunakan sebagai set point, kemudian perubahan massa dipantau secara real-time menggunakan load cell.
2	<i>Performance Tests of Loadcell as Real-Time Moisture Content Sensor: Case Study Moringa Oleifera Leaves Drying — Pramono dkk.</i>	Pramono dkk. menggunakan load cell berkapasitas 1 kg dan HX711 untuk mengukur perubahan berat secara real-time selama proses pengeringan. Hasil pengujian memperoleh nilai R ² sebesar 0,9815 dan MAE sebesar 3,78% [2].	Data massa pada penelitian ini dikembangkan tidak hanya untuk monitoring, tetapi juga diolah menjadi persentase susut bobot secara real-time dan digunakan sebagai parameter pada sistem otomatis.
3	<i>Timbangan Digital Buah Kelapa Sawit Berbasis Internet of Things (IoT) — Indani dkk.</i>	Indani dkk. mengembangkan sistem penimbangan berbasis ESP32 dan load cell. Hasil pengujian	Load cell pada penelitian ini digunakan di dalam proses pengeringan. Selain pengujian akurasi

		menunjukkan akurasi rata-rata sebesar 98,03% pada beban yang sama dan 99,28% pada beban yang bervariasi [3].	terhadap alat ukur referensi, hasil pembacaannya digunakan sebagai dasar perhitungan susut bobot.
4	<i>Perancangan dan Implementasi Sistem Pemantauan serta Pengendalian Kelembapan pada Alat Pengering Produk Pangan Berbasis IoT — Fissabillillah dkk.</i>	Fissabillillah dkk. menggunakan ESP32, DHT22, thermocouple, dan exhaust fan untuk melakukan pemantauan serta pengendalian kelembapan pada ruang pengering [4].	Sistem dikembangkan dengan menggabungkan kontrol kelembapan dengan monitoring massa dan susut bobot sehingga ketiga fungsi berada dalam satu sistem chili dehydrator.
5	<i>Perancangan dan Implementasi Kipas Angin Otomatis Berbasis ESP32 dan DHT11 untuk Pengendalian Suhu Ruangan — Pradana dkk</i>	Penelitian ini menerapkan metode hysteresis untuk mengatur kondisi kipas agar tidak mengalami perubahan status secara cepat ketika nilai sensor berfluktuasi di sekitar batas kendali [6].	Metode ON-OFF hysteresis pada penelitian ini diterapkan untuk mengendalikan exhaust fan berdasarkan nilai kelembapan DHT22 di dalam ruang pengering.

Berdasarkan Tabel 2.1, penelitian terdahulu telah membahas proses pengeringan cabai, monitoring massa menggunakan load cell, pengujian akurasi sensor, serta kontrol kelembapan dan metode hysteresis. Namun, fokus penelitian tersebut masih berada pada bagian sistem yang berbeda-beda. Penelitian ini mengembangkan sistem dengan mengintegrasikan monitoring massa, perhitungan susut bobot secara real-time, serta kontrol kelembapan dalam satu chili dehydrator berbasis ESP32. Data massa tidak hanya ditampilkan sebagai hasil monitoring, tetapi juga digunakan untuk menghitung persentase susut bobot dan menjadi acuan penghentian pemanasan, sedangkan nilai kelembapan digunakan sebagai masukan kontrol ON-OFF hysteresis pada exhaust fan.

2.2 Proses Pengeringan Cabai

Pengeringan merupakan proses pengurangan kandungan air pada bahan melalui pemberian energi panas dan perpindahan massa dari bahan menuju lingkungan. Pada proses pengeringan cabai, air yang terdapat di dalam bahan mengalami perpindahan menuju permukaan dan selanjutnya menguap ke udara. Pelepasan air tersebut menyebabkan massa cabai mengalami penurunan secara bertahap selama proses pengeringan. Fadhilatunnur dkk. menunjukkan bahwa proses pengeringan cabai merah menggunakan kombinasi pemanasan dan aliran udara menyebabkan penurunan kandungan air akibat perpindahan massa air dari bahan menuju lingkungan [7]. Temperatur merupakan salah satu parameter yang memengaruhi proses pengeringan dan perubahan massa cabai. Pratama dkk. melakukan pengeringan cabai merah menggunakan temperatur 60°C, 70°C, dan 80°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengeringan pada temperatur 60°C menghasilkan susut bobot sebesar 80%, pada temperatur 70°C sebesar 87,2%, dan pada temperatur 80°C sebesar 90%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan temperatur pengeringan diikuti oleh perubahan susut bobot bahan [1].

Selain temperatur, kelembapan relatif atau *relative humidity* (RH) merupakan parameter lingkungan yang berkaitan dengan proses pelepasan air dari bahan. Khathir dkk. melakukan pengeringan cabai rawit hijau menggunakan alat pengering terowongan Hohenheim Aceh dengan parameter pengamatan berupa temperatur, kelembapan relatif, perubahan berat sampel, dan kadar air. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi temperatur dan RH pada ruang pengering berkaitan dengan efektivitas proses pengeringan, sehingga kedua parameter tersebut perlu dimonitor selama proses berlangsung [8]. Selain temperatur dan kelembapan relatif, aliran udara juga berperan dalam proses pengeringan karena membantu membawa udara lembap keluar dari ruang pengering. Fadhilatunnur dkk. melakukan pengeringan cabai merah menggunakan kombinasi pemanasan *oven microwave* dan penghembusan udara menggunakan kipas. Penggunaan aliran udara selama proses pengeringan membantu pertukaran udara di sekitar bahan sehingga uap air hasil proses pengeringan dapat dialirkan keluar dari lingkungan bahan [7]. Oleh karena itu, pada sistem pengering penggunaan kipas dapat dimanfaatkan untuk membantu

mengatur sirkulasi udara dan kondisi kelembapan di dalam ruang pengering. Berdasarkan uraian tersebut, proses pengeringan pada penelitian ini diamati melalui tiga parameter utama, yaitu massa cabai, temperatur, dan kelembapan udara. Massa cabai mengalami perubahan selama proses pengeringan dan dipantau secara *real-time* menggunakan *load cell* sebagai dasar perhitungan persentase susut bobot (*mass loss*). Temperatur digunakan untuk memantau kondisi pemanasan ruang pengering, sedangkan kelembapan yang dibaca oleh sensor DHT22 digunakan sebagai masukan pada sistem kendali *ON-OFF hysteresis* untuk mengendalikan *exhaust fan*. Dengan demikian, parameter massa, temperatur, dan kelembapan menjadi bagian dari sistem monitoring dan pengendalian otomatis pada *chili dehydrator* yang dikembangkan.

2.3 Alat Pengering (*Dehydrator*)

Alat pengering atau *dehydrator* merupakan perangkat yang digunakan untuk mengurangi kandungan air pada bahan dengan memanfaatkan sumber panas dan aliran udara di dalam ruang pengering. Penggunaan alat pengering memungkinkan proses pengeringan dilakukan dalam kondisi yang lebih terkontrol dibandingkan pengeringan secara langsung menggunakan sinar matahari. Santoso dkk. mengembangkan alat pengering cabai dengan sistem efek rumah kaca yang dilengkapi ruang pengering, kolektor panas, serta kipas sebagai bagian dari sistem sirkulasi udara [9]. Secara umum, sistem pengering terdiri atas sumber panas, ruang pengering, sistem sirkulasi udara, serta perangkat monitoring dan kendali. Sumber panas digunakan untuk memberikan energi selama proses pengeringan, sedangkan aliran udara membantu membawa udara lembap keluar dari ruang pengering. Santoso dkk. menggunakan kipas input untuk menyalurkan udara panas menuju ruang pengering dan melakukan pengujian fungsional terhadap ruang serta komponen elektronika pada alat yang dikembangkan [9]. Penggunaan sistem berbasis mikrokontroler memungkinkan kondisi ruang pengering dipantau dan aktuatur dikendalikan secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor. Fissabillillah dkk. mengembangkan sistem pemantauan dan pengendalian kelembapan pada alat pengering produk pangan menggunakan ESP32 sebagai pusat pengolahan data, sensor DHT22 untuk membaca kondisi kelembapan, serta *exhaust*

fan sebagai aktuator [4]. Data sensor diproses secara *real-time* dan digunakan sebagai masukan untuk mengatur operasi *exhaust fan* berdasarkan kondisi ruang pengering. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor, mikrokontroler, dan aktuator dapat digunakan untuk membentuk sistem monitoring dan pengendalian otomatis pada proses pengeringan [4].

Pada penelitian ini, *chili dehydrator* digunakan sebagai *plant* yang mengintegrasikan sistem pemanasan, monitoring massa, monitoring temperatur dan kelembapan, serta pengendalian *exhaust fan*. ESP32 berfungsi sebagai pusat akuisisi dan pengolahan data serta pengendalian aktuator. Massa cabai dibaca secara *real-time* menggunakan *load cell* melalui modul HX711, sedangkan temperatur dan kelembapan ruang pengering diperoleh melalui sensor DHT22. Data massa selanjutnya diolah menjadi persentase susut bobot (*mass loss*), sedangkan data kelembapan digunakan sebagai masukan pada sistem kendali *exhaust fan*.

Sistem pengering yang dikembangkan memiliki dua mekanisme otomatis utama. Pertama, perubahan massa hasil pembacaan *load cell* digunakan untuk menghitung persentase susut bobot secara *real-time*. Pada mode otomatis, pemanasan dihentikan ketika nilai susut bobot mencapai set point 87,2% yang mengacu pada hasil penelitian Pratama dkk. [1]. Kedua, *exhaust fan* dikendalikan menggunakan metode *ON-OFF hysteresis* berdasarkan nilai kelembapan yang dibaca oleh sensor DHT22. Batas atas digunakan sebagai kondisi aktivasi *exhaust fan*, sedangkan batas bawah digunakan sebagai kondisi deaktivasi. Dengan demikian, *chili dehydrator* yang dikembangkan mengintegrasikan proses akuisisi data sensor, pengolahan data, monitoring, dan pengendalian aktuator dalam satu sistem berbasis ESP32.

2.4 Penyusutan Massa (*Mass Loss*)

Penyusutan massa atau *mass loss* merupakan penurunan massa bahan yang terjadi selama proses pengeringan. Penurunan tersebut terutama disebabkan oleh berkurangnya kandungan air di dalam bahan akibat proses pemanasan. Semakin lama proses pengeringan berlangsung, air di dalam bahan akan terus dilepaskan ke lingkungan sehingga massa bahan akan berkurang secara bertahap. Pada penelitian yang dilakukan oleh Pratama dkk., perubahan temperatur pengeringan

menghasilkan nilai susut bobot yang berbeda. Pengeringan pada temperatur 60°C menghasilkan susut bobot sebesar 80%, pada temperatur 70°C sebesar 87,2%, dan pada temperatur 80°C sebesar 90% [1]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan massa dapat digunakan sebagai salah satu parameter untuk melihat perkembangan proses pengeringan. Besarnya massa yang hilang selama proses pengeringan dapat dihitung dari selisih antara massa awal bahan dengan massa pada waktu tertentu. Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan pada Persamaan (2.1).

$$\Delta m(t) = m_0 - m_t \quad (2.1)$$

Sebagai contoh, apabila massa awal cabai sebesar 100 gram dan setelah proses pengeringan berlangsung massa yang terbaca menjadi 70 gram, maka massa yang telah berkurang dapat dihitung sebagai berikut $\Delta m(t) = 100 - 70 = 30$ gram, hasil tersebut menunjukkan bahwa selama proses pengeringan telah terjadi pengurangan massa sebesar 30 gram dari massa awal. Selain dinyatakan dalam satuan massa, perubahan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persentase susut bobot. Persentase susut bobot diperoleh dengan membandingkan massa yang berkurang terhadap massa awal bahan. Perhitungan susut bobot yang digunakan mengacu pada hubungan antara massa awal dan massa akhir bahan [1]. Untuk sistem monitoring *real-time*, persamaan tersebut digunakan dalam Persamaan 2.2 berikut.

$$\text{Susut Bobot} = \frac{m_{\text{awal}} - m_{\text{akhir}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Apabila massa awal cabai sebesar 100 gram dan massa akhir yang diperoleh sebesar 70 gram, maka persentase susut bobot dapat dihitung sebagai $\text{Susut Bobot} = \frac{100 - 70}{100} \times 100\% = 30\%$. Dengan demikian, penurunan massa dari 100 gram menjadi 70 gram menunjukkan bahwa bahan telah mengalami susut bobot sebesar 30% dari massa awalnya. Pada sistem yang dikembangkan, pembacaan massa dilakukan secara *real-time* menggunakan load cell. Oleh karena itu, massa akhir pada Persamaan (2.2) tidak hanya digunakan setelah proses pengeringan selesai, tetapi digantikan dengan massa aktual yang terbaca pada waktu tertentu. Perhitungan susut bobot secara *real-time* dapat dinyatakan pada Persamaan (2.3).

$$\text{Susut Bobot}(t) = \frac{m_{\text{awal}} - m_{\text{aktual}}}{m_{\text{awal}}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Susut Bobot (t) merupakan persentase susut bobot pada waktu t . Dengan pendekatan tersebut, sistem dapat memperbarui nilai persentase susut bobot setiap kali data massa baru diperoleh dari *load cell*. Persamaan susut bobot yang menggunakan hubungan antara massa awal dan massa akhir sebelumnya telah digunakan pada penelitian Pratama dkk. [1]. Sebagai contoh, apabila massa awal cabai sebesar 100 gram dan pada suatu waktu massa yang terbaca oleh *load cell* sebesar 40 gram, maka nilai susut bobot yang diperoleh adalah $susut\ bobot\ (t) = \left(\frac{100-40}{100}\right) \times 100\% = 60\%$ Artinya, pada saat massa aktual mencapai 40 gram, bahan telah mengalami penyusutan sebesar 60% dari massa awal. Nilai ini akan terus diperbarui selama proses pengeringan setiap kali sistem memperoleh data massa baru dari *load cell*.

Penggunaan perubahan massa sebagai parameter selama proses pengeringan juga telah diterapkan pada penelitian sebelumnya. Alfauzi dkk. menggunakan *load cell* untuk membaca perubahan massa bahan secara real-time pada sistem pengering berbasis ESP32. Data massa digunakan untuk menentukan kondisi bahan dan menjadi dasar penghentian proses ketika massa telah mencapai target yang ditentukan [10].

Pada penelitian ini, persentase susut bobot digunakan sebagai salah satu parameter pada mode otomatis. Nilai susut bobot sebesar 87,2% yang diperoleh pada pengeringan temperatur 70°C berdasarkan penelitian Pratama dkk. digunakan sebagai *set point* penghentian proses pemanasan [1]. Nilai tersebut tidak ditentukan kembali melalui optimasi kualitas cabai pada penelitian ini, tetapi digunakan sebagai parameter acuan pada sistem. Sebagai contoh, apabila massa awal cabai sebesar 100 gram, susut bobot sebesar 87,2% menunjukkan bahwa massa bahan telah berkurang sebesar 87,2 gram sehingga massa yang tersisa sebesar 12,8 gram. Ketika persentase susut bobot yang dihitung secara *real-time* mencapai atau melebihi *set point*, ESP32 memberikan perintah untuk menonaktifkan *heater*. Untuk mengevaluasi penyimpangan nilai susut bobot pada saat *heater* berhenti terhadap *set point*, digunakan nilai *error* yang dinyatakan pada Persamaan (2.4) dan Persamaan (2.5).

$$e_{SB} = SB_{off} - SB_{set} \quad (2.4)$$

Dengan besar nilai absolut sebagai berikut.

$$AE_{SB} = |SB_{off} - SB_{set}| \quad (2.5)$$

Nilai *error* digunakan untuk mengetahui seberapa dekat respons penghentian pemanasan terhadap nilai acuan yang diterapkan. Konsep perhitungan *error* terhadap nilai referensi selanjutnya juga digunakan dalam evaluasi kinerja sensor.

2.5 Sensor Massa (*Load Cell*)

Load cell merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur gaya atau beban dengan mengubah perubahan mekanis menjadi sinyal listrik. Pada saat beban diberikan, elemen elastis pada *load cell* mengalami deformasi yang menyebabkan perubahan resistansi pada *strain gauge*. Perubahan tersebut kemudian menghasilkan sinyal listrik yang dapat diolah menjadi nilai massa. Saputra dkk. menggunakan *load cell* dan modul HX711 pada sistem neraca digital serta mengevaluasi kinerjanya berdasarkan linearitas, pengulangan, akurasi, dan kestabilan pembacaan [11].

Pada *load cell*, *strain gauge* umumnya disusun dalam konfigurasi jembatan Wheatstone. Susunan tersebut digunakan untuk menghasilkan perubahan tegangan diferensial ketika sensor menerima beban. Sinyal keluaran yang dihasilkan memiliki nilai yang relatif kecil sehingga belum dapat langsung digunakan oleh mikrokontroler. Oleh karena itu, diperlukan modul penguat sekaligus *Analog to Digital Converter* (ADC), yaitu HX711, sebelum data diteruskan dan diproses oleh ESP32.

Sistem monitoring massa pada *chili dehydrator* menggunakan empat buah *load cell* yang ditempatkan pada empat titik penopang tray. Penggunaan beberapa titik sensor bertujuan agar beban yang terdapat pada tray dapat dibaca dari masing-masing titik sebelum seluruh hasil pembacaan dijumlahkan menjadi massa total. Pendekatan menggunakan beberapa *load cell* untuk memperoleh distribusi pembebanan juga diterapkan oleh Hakim dkk. pada sistem pengukuran berat [12].

Nilai keluaran awal *load cell* masih berupa data pembacaan sensor sehingga perlu dikalibrasi terhadap beban yang nilainya telah diketahui. Kalibrasi digunakan untuk memperoleh hubungan antara nilai keluaran sensor dengan massa referensi. Hakim dkk. melakukan kalibrasi *load cell* menggunakan hubungan linier antara pembacaan sensor dan berat aktual sebelum hasilnya dievaluasi berdasarkan kesalahan pengukuran [12]. Hubungan linier antara pembacaan sensor dan massa dapat dinyatakan pada Persamaan (2.6)

$$m = aR + b \quad (2.6)$$

Nilai a menunjukkan kemiringan atau faktor perubahan pembacaan sensor terhadap massa, sedangkan b menunjukkan nilai offset pada hasil kalibrasi. Pada sistem yang menggunakan proses tare, pembacaan awal saat tray belum diberi bahan ditetapkan sebagai titik nol sehingga pengaruh massa tray dan nilai awal sensor dapat dikurangi sebelum proses pengukuran dilakukan.

Setelah proses *tare* dilakukan, nilai pembacaan terbaru dari masing-masing *load cell* dibandingkan dengan nilai pembacaan saat *tare*. Selisih tersebut menunjukkan perubahan nilai RAW yang disebabkan oleh beban yang diberikan. Hubungan antara pembacaan aktual dan nilai *tare* dinyatakan pada Persamaan (2.7).

$$\Delta RAW_i = RAW_{current,i} - RAW_{tare,i} \quad (2.7)$$

Nilai ΔRAW_i selanjutnya dikonversi menjadi massa menggunakan faktor kalibrasi masing-masing *load cell*. Proses konversi tersebut dinyatakan pada Persamaan (2.8).

$$W_i = \frac{\Delta RAW_i}{CAL_{sc,i}} \quad (2.8)$$

Pada penelitian ini, keempat *load cell* dikalibrasi secara terpisah karena setiap sensor dapat menghasilkan karakteristik pembacaan yang berbeda meskipun tipe dan kapasitasnya sama. Faktor kalibrasi yang diperoleh dari masing-masing sensor digunakan pada Persamaan (2.8) untuk mengubah perubahan nilai RAW menjadi massa. Setelah nilai massa dari setiap *load cell* diperoleh, seluruh hasil pembacaan dijumlahkan untuk mendapatkan massa total bahan seperti pada Persamaan (2.9).

$$m_{total} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 \quad (2.9)$$

Massa total tersebut selanjutnya digunakan sebagai data utama pada sistem monitoring dan menjadi dasar dalam perhitungan susut bobot. Oleh karena itu, perubahan atau penyimpangan pada salah satu load cell dapat memengaruhi massa total yang digunakan oleh sistem.

Dalam kondisi aktual, hasil pembacaan load cell tidak selalu menghasilkan nilai yang benar-benar tetap meskipun beban tidak mengalami perubahan. Fluktuasi dapat muncul akibat noise, getaran mekanis, perubahan distribusi beban pada tray, maupun kondisi sistem akuisisi data. Pada proses pengeringan, kondisi pengukuran juga bersifat dinamis karena terdapat aliran udara, perubahan posisi atau distribusi bahan, serta perubahan temperatur di dalam ruang pengering. Data pengujian pada sistem ini juga menunjukkan adanya kenaikan massa sesaat meskipun kecenderungan massa secara keseluruhan tetap menurun.

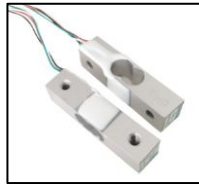
Perubahan temperatur perlu diperhatikan karena load cell digunakan di dalam sistem pengering dengan kondisi suhu yang berubah selama proses berlangsung. Namun, keberadaan temperatur sebagai penyebab utama penyimpangan pembacaan tidak dapat langsung ditetapkan hanya berdasarkan munculnya fluktuasi. Begitu pula dengan gangguan pada sistem kelistrikan atau suplai daya. Kedua faktor tersebut perlu diuji secara terpisah agar dapat diketahui apakah perubahan pembacaan berasal dari temperatur, kondisi catu daya, gangguan mekanis, atau kombinasi beberapa faktor. Dengan demikian, pembahasan mengenai sumber gangguan pada load cell perlu didasarkan pada hasil validasi pengujian, bukan hanya dugaan.

Untuk mengurangi perubahan pembacaan yang terjadi dalam waktu singkat, penelitian ini menggunakan metode Simple Moving Average (SMA). Metode tersebut bekerja dengan mengambil rata-rata dari sejumlah data pembacaan terbaru sehingga perubahan sesaat pada sinyal dapat dikurangi. Penggunaan moving average pada data sensor dapat menghasilkan pembacaan yang lebih stabil [15]–[17]. Perhitungan SMA dinyatakan pada Persamaan (2.10).

$$m_f[k] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} m[k-j] \quad (2.10)$$

Pada penelitian ini digunakan metode *Simple Moving Average* (SMA) dengan window sebanyak 10 sampel. Setiap data pembacaan massa yang masuk disimpan sebagai bagian dari 10 data terbaru, kemudian nilai rata-ratanya dihitung untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih stabil.

Data massa yang telah melalui proses kalibrasi dan *filtering* selanjutnya diproses oleh ESP32 sebagai nilai massa aktual. Nilai tersebut digunakan untuk monitoring massa secara *real-time* serta sebagai masukan dalam perhitungan persentase susut bobot selama proses pengeringan. Dengan demikian, *load cell* berperan sebagai sumber data utama dalam sistem monitoring massa dan perhitungan susut bobot pada *chili dehydrator*.



Gambar 2.1 Sensor Load Cell [18]

Untuk mendukung kinerja pengukuran massa pada sistem, digunakan *load cell* tipe *full bridge* seperti pada Gambar 2.1 yang memiliki sensitivitas dan kestabilan yang baik dalam mendeteksi perubahan beban. Spesifikasi teknis dari *load cell* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor Load Cell

Parameter	Spesifikasi
Dimensions	~7,5 x 12,7 x 12,7 mm
Sensitivitas	~1,0 – 0,1 mV/V
Output Signal	Analog (mV)
Resistansi <i>Input</i>	1000 $\pm$ 50 Ω
Resistansi <i>Output</i>	1000 $\pm$ 50 Ω
Daya	~0,05 W
Tegangan Eksitasi	5-10 V DC
Akurasi	$\pm$ 0,03% – $\pm$ 0,05%FS
Rated Load	5Kg

2.6 Metode Perhitungan Error

Kinerja sistem pengukuran massa dapat dievaluasi dengan membandingkan hasil pembacaan load cell terhadap massa yang digunakan sebagai referensi. Perbandingan ini diperlukan untuk melihat seberapa dekat nilai yang dihasilkan sensor dengan nilai sebenarnya. Saputra dkk. melakukan evaluasi sistem pengukuran massa melalui pengujian akurasi, pengulangan, dan kestabilan pembacaan, sedangkan Hakim dkk. membandingkan hasil pembacaan load cell dengan beban referensi setelah proses kalibrasi dilakukan [11], [12].

Salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui penyimpangan hasil pengukuran adalah persentase error. Nilai error diperoleh dari selisih antara massa aktual dengan hasil pembacaan sensor yang dibandingkan terhadap massa aktual. Perhitungan persentase error ditunjukkan pada Persamaan (2.11) [13]

$$Error(\%) = \left| \frac{W_{aktual} - W_{sensor}}{W_{aktual}} \right| \times 100 \quad (2.11)$$

Nilai akurasi selanjutnya diperoleh dengan mengurangi nilai persentase *error* dari 100%, seperti pada Persamaan (2.12).

$$Akurasi(\%) = 100\% - \% error \quad (2.12)$$

Nilai *error* yang kecil menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik. Dalam sistem pengukuran massa berbasis *load cell*, nilai *error* yang dapat diterima umumnya berada di bawah 5%, tergantung pada kualitas sensor dan proses kalibrasi yang dilakukan [11]. Semakin kecil nilai *error*, maka hasil pembacaan sensor semakin mendekati massa referensi. Sebaliknya, nilai *error* yang lebih besar menunjukkan adanya penyimpangan yang lebih tinggi pada hasil pengukuran.

Selain mengevaluasi *error* pada masing-masing titik pengujian, penyimpangan keseluruhan data juga dianalisis menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE). MAE menunjukkan rata-rata nilai absolut dari selisih antara hasil pembacaan *load cell* dengan massa referensi. Karena menggunakan nilai absolut, kesalahan positif dan negatif tidak saling menghilangkan. Hakim dkk. menggunakan MAE untuk mengevaluasi penyimpangan hasil pembacaan *load cell* terhadap nilai aktual [12]. Perhitungan MAE ditunjukkan pada Persamaan (2.13).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_{LC,i} - m_{ref,i}| \quad (2.13)$$

Dengan (n) merupakan jumlah data pengujian. Semakin kecil nilai MAE, semakin dekat secara rata-rata hasil pembacaan sensor terhadap massa referensi. Selain MAE, parameter Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk mengevaluasi kesalahan pengukuran dengan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap nilai penyimpangan yang tinggi melalui proses pengkuadratan kesalahan. Penggunaan MAE dan RMSE secara bersamaan dapat memberikan gambaran mengenai besarnya kesalahan rata-rata sekaligus menunjukkan adanya penyimpangan yang relatif besar pada hasil pengukuran. Pendekatan menggunakan kedua parameter tersebut juga digunakan dalam penelitian evaluasi sensor untuk menilai kesesuaian hasil pengukuran terhadap instrumen referensi [14]. Perhitungan RMSE ditunjukkan pada Persamaan (2.14).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_{LC,i} - m_{ref,i})^2} \quad (2.14)$$

Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa secara keseluruhan hasil pembacaan sensor berada dekat dengan massa referensi. Apabila nilai RMSE lebih besar dibandingkan MAE, kondisi tersebut dapat menunjukkan bahwa terdapat beberapa hasil pengukuran yang memiliki penyimpangan lebih tinggi dibandingkan kesalahan rata-rata.

Selain ketepatan terhadap massa referensi, kestabilan pembacaan juga perlu diperhatikan karena *load cell* digunakan secara kontinu selama proses pengeringan. Kestabilan hasil pengukuran dapat diamati dari sebaran data ketika pengukuran dilakukan berulang pada kondisi beban yang sama. Pada penelitian ini, standar deviasi digunakan untuk melihat besarnya variasi hasil pembacaan terhadap nilai rata-ratanya. Perhitungan standar deviasi ditunjukkan pada Persamaan (2.15).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n-1}} \quad (2.15)$$

Dengan:

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (2.16)$$

Semakin kecil nilai standar deviasi, maka hasil pembacaan pada beban yang sama semakin terkumpul di sekitar nilai rata-ratanya. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang lebih besar menunjukkan bahwa pembacaan sensor memiliki variasi yang lebih tinggi. Pengulangan dan kestabilan pembacaan juga digunakan sebagai bagian dari evaluasi sistem pengukuran massa berbasis *load cell* pada penelitian sebelumnya [11].

Pada penelitian ini, parameter persentase *error*, akurasi, MAE, RMSE, dan standar deviasi digunakan untuk mengevaluasi hasil pembacaan *load cell*. Persentase *error* dan akurasi digunakan untuk melihat kesesuaian pembacaan pada masing-masing massa referensi, sedangkan MAE dan RMSE digunakan untuk melihat penyimpangan keseluruhan data. Standar deviasi digunakan untuk melihat konsistensi hasil pembacaan ketika pengukuran dilakukan secara berulang pada beban yang sama.

2.7 Modul HX711

Modul HX711 merupakan rangkaian penguat sinyal sekaligus *Analog to Digital Converter* (ADC) yang digunakan pada sistem pengukuran massa berbasis *load cell*. Sinyal keluaran dari *load cell* memiliki amplitudo yang relatif kecil sehingga memerlukan penguatan sebelum dapat diproses oleh mikrokontroler. Pramono dkk. menggunakan kombinasi *load cell* dan HX711 untuk memperoleh data perubahan berat secara real-time selama proses pengeringan [2].

Pada saat *load cell* menerima beban, perubahan resistansi pada *strain gauge* menghasilkan perubahan tegangan yang sangat kecil. Sinyal tersebut kemudian diterima oleh HX711, diperkuat melalui rangkaian penguat internal, lalu dikonversi menjadi data digital dengan resolusi 24-bit sebelum dikirimkan ke mikrokontroler [19]. Dengan proses tersebut, perubahan sinyal dari *load cell* dapat diolah lebih lanjut menjadi data massa. HX711 memiliki dua saluran masukan, yaitu *Channel A* dan *Channel B*. *Channel A* memiliki pilihan penguatan sebesar 128 atau 64, sedangkan *Channel B* memiliki penguatan sebesar 32. Pada sistem pengukuran massa, *Channel A* digunakan karena memiliki tingkat penguatan yang lebih tinggi. Komunikasi antara HX711 dan ESP32 dilakukan melalui dua jalur, yaitu *Data Output* (DT) dan *Serial Clock* (SCK).

Pada sistem *chili dehydrator*, masing-masing *load cell* dihubungkan dengan satu modul HX711 sehingga pembacaan dari empat titik penopang tray dapat diperoleh secara terpisah. Data digital dari setiap HX711 kemudian diterima oleh ESP32 untuk diproses menjadi nilai massa. Tahapan pengolahan meliputi penentuan nilai awal melalui proses *tare*, konversi nilai pembacaan menggunakan faktor kalibrasi, serta penyaringan data sebelum digunakan sebagai hasil monitoring. Kualitas pembacaan HX711 berpengaruh terhadap data massa yang diterima sistem. Gangguan listrik, getaran mekanis, perubahan distribusi beban, maupun kondisi lingkungan pengukuran dapat menyebabkan hasil pembacaan mengalami fluktuasi. Oleh karena itu, data yang diperoleh dari HX711 tidak langsung digunakan sebagai nilai akhir, tetapi melalui proses pengolahan terlebih dahulu agar hasil monitoring massa lebih stabil.



Gambar 2.2 Modul HX711 [20]

Pada penelitian ini, HX711 berfungsi sebagai penghubung antara *load cell* dan ESP32. Nilai digital yang diperoleh dari HX711 menjadi data awal yang selanjutnya digunakan untuk memperoleh massa aktual, menghitung persentase susut bobot, dan menampilkan perubahan massa secara real-time selama proses pengeringan. Bentuk fisik modul HX711 ditunjukkan pada Gambar 2.2, sedangkan spesifikasi modul yang digunakan ditampilkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi Modul HX711

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	2,6-5,5 V DC
Konsumsi Arus	< 1,5 mA
Channel Input	2 Channel (A dan B)
Tipe Komunikasi	Serial (DT dan SCK)
Resolusi	24-bit
Suhu Operasi	-40°C hingga 85°C

2.8 Sensor Kelembaban Udara (DHT22)

Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembapan relatif udara atau *Relative Humidity* (RH). Pada proses pengeringan, kelembapan menjadi salah satu parameter yang perlu diamati karena air yang keluar dari bahan selama pemanasan akan berubah menjadi uap air dan memengaruhi kondisi udara di dalam ruang pengering.

**Gambar 2.3** Sensor DHT22 [23]

DHT22 dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler sehingga hasil pembacaannya dapat digunakan sebagai data monitoring maupun sebagai masukan pada sistem kendali. Fissabillillah dkk. menggunakan sensor DHT22 pada sistem pemantauan dan pengendalian kelembapan alat pengering berbasis ESP32. Pada penelitian tersebut, nilai kelembapan digunakan untuk mengetahui kondisi ruang pengering dan menjadi dasar dalam pengendalian sirkulasi udara menggunakan *exhaust fan* [4].

Pada penelitian ini, DHT22 digunakan untuk membaca kondisi ruang *chili dehydrator* secara real-time. Nilai temperatur digunakan sebagai informasi kondisi selama proses pengeringan, sedangkan nilai kelembapan digunakan sebagai variabel masukan pada sistem pengendalian *exhaust fan*. Dengan demikian, fungsi utama DHT22 pada sistem yang dikembangkan adalah menyediakan data kelembapan yang digunakan dalam kontrol ON-OFF *hysteresis*.

Bentuk fisik sensor DHT22 ditunjukkan pada Gambar 2.3, sedangkan spesifikasi sensor yang digunakan ditampilkan pada Tabel 2.4. [23], [24].

Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor DHT22 [24]

Parameter	Spesifikasi
Power Input	3,3-6 V DC
Sensing Period	Average: 2s
Accuracy Humidity	+/- 2% hingga +/- 5%RH
Resolution or Sensitivity Humidity	0,1% RH
Repeatability Humidity	+/- 1% RH
Humidity Hysteresis	+/- 0,3% RH

2.9 Metode kendali on-off

Kendali ON-OFF merupakan metode pengendalian yang menghasilkan dua kondisi keluaran, yaitu ON dan OFF. Pada sistem yang hanya menggunakan satu nilai batas, perubahan kecil pada variabel proses di sekitar batas tersebut dapat menyebabkan aktuator berpindah kondisi secara berulang dalam waktu yang relatif singkat. Untuk mengurangi kondisi tersebut, digunakan metode *hysteresis* dengan dua nilai batas, yaitu batas atas dan batas bawah. Perubahan kondisi aktuator tidak terjadi pada satu nilai yang sama, tetapi mengikuti posisi variabel proses terhadap kedua batas tersebut.

Pada pengendalian kelembapan, batas atas dinyatakan sebagai RH_{On} , yaitu nilai kelembapan yang digunakan untuk mengaktifkan aktuator. Sementara itu, batas bawah dinyatakan sebagai RH_{Off} , yaitu nilai kelembapan yang digunakan untuk menonaktifkan aktuator. Selisih antara kedua batas tersebut membentuk daerah *hysteresis* yang dinyatakan pada Persamaan (2.17).

$$H = RH_{On} - RH_{Off} \quad (2.17)$$

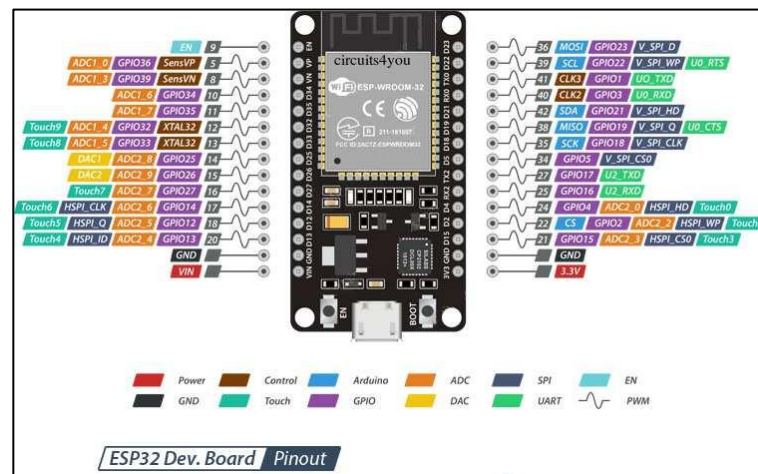
Selama nilai RH berada di antara RH_Off dan RH_On, kondisi aktuator dipertahankan sesuai dengan status sebelumnya. Dengan cara tersebut, aktuator tidak langsung mengalami perubahan kondisi akibat fluktuasi kecil pada nilai kelembapan.

Aji dkk. menerapkan metode *hysteresis* pada sistem pengendalian temperatur dan kelembapan inkubator tempe. Pada pengendalian kelembapan, digunakan batas bawah sebesar 69% RH dan batas atas sebesar 70% RH sehingga perubahan kondisi aktuator tidak terjadi pada satu titik yang sama. Penerapan tersebut digunakan untuk mengurangi perubahan kondisi relay yang terlalu cepat [21]. Konsep serupa diterapkan oleh Tanujaya dkk. pada sistem *urban farming* berbasis IoT. Sistem menggunakan batas bawah kelembapan sebesar 28% dan batas atas sebesar 36% untuk menentukan kondisi kerja pompa *misting*. Perbedaan kedua nilai tersebut membentuk rentang *hysteresis* sebesar 8% [22].

Pada penelitian ini, metode ON-OFF *hysteresis* digunakan untuk mengendalikan *exhaust fan* berdasarkan nilai kelembapan yang dibaca oleh DHT22. Ketika nilai RH mencapai atau melebihi RH_On, *exhaust fan* diaktifkan. Ketika nilai RH turun hingga mencapai atau berada di bawah RH_Off, *exhaust fan* dinonaktifkan. Apabila nilai RH berada di antara kedua batas tersebut, kondisi *exhaust fan* dipertahankan sesuai dengan status sebelumnya. Penggunaan dua batas tersebut bertujuan agar *exhaust fan* tidak terus mengalami perubahan kondisi ON dan OFF akibat fluktuasi kecil pada hasil pembacaan sensor. Dengan demikian, metode *hysteresis* memberikan rentang kerja yang lebih stabil pada sistem pengendalian kelembapan

2.10 Mikrokontroler (ESP32)

ESP32 merupakan mikrokontroler yang digunakan sebagai pusat pengolahan data dan pengendalian pada sistem *chili dehydrator*. Mikrokontroler ini memiliki berbagai antarmuka komunikasi seperti GPIO, ADC, UART, SPI, dan I2C yang memungkinkan integrasi dengan beberapa sensor, modul, dan aktuator dalam satu sistem [25].



Gambar 2.4 Board ESP32 [26]

Selain mendukung komunikasi antarperangkat, ESP32 juga memiliki kemampuan komunikasi nirkabel melalui Wi-Fi dan Bluetooth. Fitur tersebut memungkinkan data hasil pembacaan sensor dikirimkan ke perangkat lain untuk kebutuhan monitoring secara real-time [28]. Pada penelitian ini, ESP32 menerima data dari empat modul HX711 yang terhubung dengan *load cell* dan dari sensor DHT22. Data dari HX711 diolah menjadi nilai massa aktual, kemudian digunakan untuk menghitung persentase susut bobot. Sementara itu, data kelembapan dari DHT22 digunakan sebagai masukan pada sistem kendali *exhaust fan*. ESP32 juga menjalankan proses *tare*, konversi hasil pembacaan berdasarkan faktor kalibrasi, serta *filtering* menggunakan metode *Simple Moving Average* sebelum nilai massa digunakan dalam sistem monitoring. Selain itu, ESP32 menentukan kondisi kerja aktuator berdasarkan parameter yang telah ditetapkan pada program.

Hasil pengolahan data selanjutnya dikirimkan ke HMI Nextion dan sistem SCADA untuk ditampilkan secara real-time. Informasi yang ditampilkan meliputi massa, susut bobot, temperatur, kelembapan, serta status kerja sistem. Dengan demikian, ESP32 berperan sebagai penghubung antara sensor, proses pengolahan data, aktuator, dan antarmuka monitoring [29]. Kinerja ESP32 juga dipengaruhi oleh kondisi catu daya yang digunakan. Tegangan suplai yang tidak stabil dapat memengaruhi kerja mikrokontroler maupun proses akuisisi data dari perangkat yang terhubung. Oleh karena itu, kestabilan catu daya perlu diperhatikan untuk menjaga konsistensi kerja sistem selama proses pengeringan berlangsung.

Bentuk fisik ESP32 ditunjukkan pada Gambar 2.4, sedangkan spesifikasi modul yang digunakan ditampilkan pada Tabel 2.5 [26], [27]

Tabel 2.5 Spesifikasi ESP32 Dev-Kit V1 Module [27]

Parameter	Spesifikasi
Operating Voltage	3.3 V
Frekuensi Operasi Maksimum	240MHz
Wi-Fi	802.11 b/g/n (<i>Speed up to 150 Mbps</i>)
Microprocessor	Tensilica Xtensa single-/dual-core 32-bit LX6 microprocessor(s)
Timers	2 x 64-bit Timers, 1 RTC Timer
DAC	2 Channels (8-bit)
ADC	18 Channels (12-bit)

Salah satu keunggulan utama ESP32 adalah kemampuannya dalam melakukan komunikasi nirkabel melalui *Wi-Fi* dan *Bluetooth*. Fitur ini memungkinkan ESP32 digunakan dalam sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), di mana data sensor dapat dikirim secara *real-time* ke perangkat lain [28]. Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan untuk mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke sistem SCADA untuk ditampilkan dan dianalisis.

Dalam implementasinya, ESP32 sebagai pusat akuisisi data dari berbagai sensor yang digunakan dalam sistem pengering cabai. Sensor *load cell* terhubung dengan modul HX711 digunakan untuk mengukur massa cabai, sensor DHT digunakan untuk mengukur kelembaban ruang pengering, Data dari seluruh sensor tersebut dikumpulkan sebagai bagian dari proses akuisisi data, kemudian diproses oleh ESP32 melalui tahapan pembacaan data secara kontinu, proses *filtering* untuk mengurangi *noise*, serta pengolahan data untuk menghasilkan parameter seperti massa, kadar air, dan kelembaban secara *real-time*.

Selain sebagai pengolah data, ESP32 juga berperan dalam pengendalian aktuatur pada sistem yaitu untuk mengontrol *exhaust fan* dan sistem pemanas. Pengendalian kipas didasarkan dari nilai kelembaban udara yang terukur, di mana ESP32 akan mengaktifkan atau mengatur kecepatan kipas sesuai dengan rentang kelembaban yang telah ditentukan.

Data hasil pengolahan oleh ESP32 selanjutnya dikirimkan ke sistem SCADA untuk ditampilkan dalam bentuk visualisasi seperti indikator nilai. Selain itu, sistem SCADA juga digunakan untuk memberikan perintah kontrol terhadap sistem, seperti pengaturan kerja *heater*. Dengan demikian, ESP32 berperan sebagai penghubung antara sensor, aktuator, dan sistem monitoring dalam suatu sistem akuisisi dan pengolahan data yang terintegrasi [29].

Penggunaan ESP32 dalam penelitian ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain kemampuan pemrosesan yang cepat, konsumsi daya yang relatif rendah, serta kemudahan dalam pemrograman. Selain itu, dukungan komunitas dan ketersediaan *library* yang luas juga mempermudah dalam pengembangan sistem berbasis ESP32. Namun demikian, ESP32 juga memiliki keterbatasan, seperti sensitivitas terhadap gangguan catu daya dan kebutuhan manajemen sistem yang baik untuk menjaga kestabilan kinerja. Oleh karena itu, dibutuhkan perancangan sistem yang baik, termasuk penggunaan *power supply* yang stabil dan pemisahan jalur sinyal untuk menghindari gangguan.

2.11 Power Supply

Power supply atau catu daya merupakan bagian dari sistem elektronika yang berfungsi menyediakan energi listrik bagi perangkat yang digunakan. Sumber listrik dari jaringan PLN berupa tegangan arus bolak-balik atau *Alternating Current* (AC), sedangkan sebagian besar perangkat seperti mikrokontroler, sensor, dan modul membutuhkan tegangan arus searah atau *Direct Current* (DC). Oleh karena itu, diperlukan rangkaian catu daya untuk menyesuaikan tegangan sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen [30].

Secara umum, proses konversi daya melibatkan beberapa bagian seperti penyearah, penyaring, dan pengatur tegangan. Pada sistem elektronika modern, catu daya jenis *Switched Mode Power Supply* (SMPS) banyak digunakan karena memiliki efisiensi yang relatif tinggi dan ukuran yang lebih ringkas. Selain itu, modul *step-down* dapat digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran agar sesuai dengan kebutuhan perangkat yang digunakan [31], [32].



Gambar 2.5 Power Supply 12 Volt [32]

Pada sistem *chili dehydrator*, catu daya digunakan untuk menyuplai ESP32, sensor DHT22, modul HX711, serta rangkaian aktuator. Setiap perangkat memiliki kebutuhan tegangan kerja yang berbeda sehingga distribusi daya perlu disesuaikan agar seluruh komponen dapat bekerja pada kondisi yang sesuai.

Kestabilan tegangan perlu diperhatikan terutama pada sistem pengukuran massa. *Load cell* menghasilkan perubahan tegangan yang relatif kecil dan sinyal tersebut kemudian diproses oleh HX711. Oleh karena itu, kondisi suplai daya yang tidak stabil berpotensi memengaruhi proses akuisisi data dan dapat menyebabkan perubahan pada hasil pembacaan sensor.

Meskipun demikian, adanya fluktuasi pembacaan *load cell* tidak dapat langsung dinyatakan berasal dari catu daya. Perubahan pembacaan juga dapat dipengaruhi oleh kondisi lain seperti temperatur, getaran mekanis, perubahan distribusi beban, maupun kondisi pemasangan sensor. Oleh sebab itu, pengaruh catu daya perlu divalidasi melalui pengujian dengan membandingkan kondisi tegangan dan hasil pembacaan sensor selama sistem beroperasi.

Pada penelitian ini digunakan *power supply* 12 V DC sebagai sumber daya utama, kemudian tegangan didistribusikan dan disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing komponen. Bentuk fisik *power supply* ditunjukkan pada Gambar 2.5, sedangkan spesifikasinya ditampilkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Spesifikasi *Power Supply* [33]

Parameter	Spesifikasi
Efisiensi	+/- 80-90%
Output Voltage	12V DC
Rentang tegangan input	100-120V AC
Frekuensi Masukan	47-63 Hz

2.12 *Fan DC*

Kipas DC (*Direct Current*) merupakan perangkat aktuator yang digunakan untuk menghasilkan aliran udara pada suatu sistem. Kipas ini bekerja dengan memanfaatkan sumber tegangan searah sebesar 12 volt untuk menggerakkan baling-baling sehingga mampu mensirkulasikan udara dari satu ruang ke ruang lainnya. Dalam proses pengeringan bahan pangan, keberadaan kipas memiliki peranan penting karena membantu mempercepat proses penguapan air dengan cara mengalirkan udara lembab keluar dari ruang pengering dan menggantinya dengan udara yang memiliki tingkat kelembaban lebih rendah. Dengan demikian, sirkulasi udara yang baik akan mendukung peningkatan efisiensi proses pengeringan.

Pengoperasian kipas dilakukan secara otomatis melalui sistem kendali berbasis sensor, sehingga kipas dapat bekerja sesuai dengan kondisi lingkungan yang terukur. Penelitian yang dilakukan oleh Irfani dkk. [34] menunjukkan bahwa sistem *exhaust fan* yang dikendalikan secara otomatis mampu merespon perubahan kondisi suhu dan kelembaban lingkungan serta meningkatkan kualitas sirkulasi udara dalam suatu ruangan.

**Gambar 2.6** *Fan DC* [35]

Pada sistem pengering, kipas DC pada Gambar 2.6 umumnya difungsikan sebagai *exhaust fan* yang berperan dalam mengontrol kelembaban udara di dalam ruang pengering. Penggunaan kipas yang dikendalikan berdasarkan data sensor memungkinkan udara lembab dikeluarkan secara lebih efektif sehingga kondisi ruang tetap terjaga. Hal ini didukung oleh penelitian Fissabillillah dkk. [4] yang menunjukkan bahwa integrasi *exhaust fan* dengan mikrokontroler ESP32 dan sensor kelembaban mampu menjaga kestabilan kondisi ruang pengering serta mengurangi potensi terjadinya kondensasi selama proses berlangsung.

Berdasarkan uraian tersebut, kipas DC dapat dikatakan memiliki spesifikasi dan performa yang memadai untuk digunakan sebagai komponen aktuator dalam sistem pengering cabai berbasis ESP32, khususnya dalam menjaga kondisi kelembaban udara agar tetap berada pada rentang yang diinginkan. Spesifikasi kipas DC dapat dilihat pada Tabel 2.7. berikut ini.

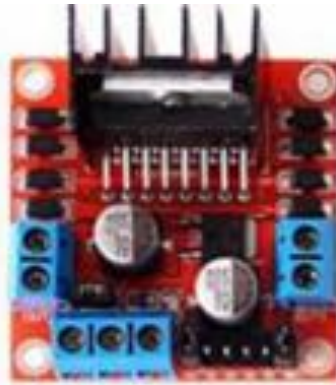
Tabel 2.7 Spesifikasi Fan DC [35]

Parameter	Spesifikasi
Nama Produk	12V DC FAN 3-Pin Silent
Merek	-
Jenis	DC Cooling Fan
Tegangan Operasional	12V DC
Fungsi	Pendingin komponen elektronik
Tipe Koneksi	3 kabel (3-Pin)

2.13 Modul Driver Motor L298N

Driver motor merupakan rangkaian yang digunakan untuk mengendalikan aktuator seperti motor DC atau kipas, karena mikrokontroler tidak mampu secara langsung menyediakan arus dan tegangan yang cukup untuk menggerakkan beban tersebut. Salah satu modul driver yang umum digunakan adalah L298N, yaitu driver motor berbasis IC H-Bridge yang memungkinkan pengendalian motor DC melalui sinyal logika dari mikrokontroler [36]. Modul ini bekerja dengan menerima sinyal *input*, kemudian menguatkannya menjadi keluaran yang mampu menggerakkan kipas sesuai dengan kebutuhan sistem.

Modul L298N pada Gambar 2.9 memiliki keunggulan yaitu kompatibilitas dengan berbagai mikrokontroler seperti ESP32, serta kemampuan dalam mengendalikan beban berupa motor DC atau kipas. Selain itu, modul ini juga mendukung pengaturan kecepatan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM), meskipun dalam beberapa aplikasi cukup digunakan dalam mode *On-Off* sesuai kebutuhan sistem [36]. Driver Motor L298N pada Gambar 2.7 memiliki spesifikasi komponen yang tertera pada Tabel 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Modul Driver Motor L298N [37]

Dalam penerapannya pada sistem pengering cabai ini, modul L298N digunakan untuk mengendalikan kipas DC sebagai *exhaust fan* dengan metode kontrol *On-Off*. Kipas akan diaktifkan atau dinonaktifkan berdasarkan nilai kelembaban yang dibaca oleh sensor DHT22. Namun, untuk mencegah terjadinya *switching* yang terlalu sering akibat fluktuasi nilai sensor, digunakan metode *hysteresis* pada sistem kontrol. Dengan metode tersebut, sistem menjadi lebih stabil. Spesifikasi modul L298N dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut ini.

Tabel 2.8 Spesifikasi Modul Driver Motor L298N [37]

Parameter	Spesifikasi
Nama Modul	L298N Motor Driver Module
Jenis Driver	Dual H-Bridge
Tegangan Input Motor	5–35 V DC
Tegangan Logika	5 V DC
Arus Output	Maksimal 2 A per channel
Jumlah Channel	2 channel
Jumlah Motor	2 motor DC
Arus Logika	0–36 mA
Daya Maksimal	25 W
Dimensi Modul	43 × 43 × 26 mm
Metode Kendali	PWM dan sinyal digital
Fungsi	Mengatur arah dan kecepatan putaran motor DC