

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Rancang bangun sistem pengendali suhu dengan kontrol PID pada alat pengering helm otomatis berbasis mikrokontroler arduino uno merupakan inovasi dalam system pengeringan secara otomatis. Sistem ini dikembangkan dengan menerapkan kendali *Proporsional Integral Derivatif* (PID) serta pemanfaatan sensor dan aktuator yang dikendalikan melalui *arduino uno*. Fokus utama sistem ini adalah mengontrol suhu secara presisi sehingga dapat mengoptimalkan proses pengeringan sehingga helm cepat kering tetapi tetap aman. Sebelum mengembangkan lebih jauh kerangka penelitian ini, penting untuk memahami konteks dan landasan teori yang telah dibangun oleh para peneliti terdahulu. Hal ini tidak hanya membantu dalam mengidentifikasi celah dalam pengetahuan yang ada, tapi juga dalam menentukan arah yang harus diambil oleh penelitian ini. Berikut adalah ringkasan dari beberapa di antaranya:

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Riko Andika dan Budi Prijo Sembodo pada Jurnal Teknik WAKTU dengan judul “Alat Pengering Helm Otomatis Berbasis LDR (light Dependent Resistors) Dengan Memanfaatkan Mesin Hair Dryer”. Jurnal ini membahas rancangan dan pengujian alat pengering helm otomatis berbasis sensor cahaya dengan memanfaatkan mesin hair dryer sebagai penghasil panas. Alat ini dirancang agar aktif secara otomatis saat intensitas cahaya rendah menandakan helm diletakkan, dan nonaktif saat cahaya terang. Dilengkapi dua tombol pengatur suhu, serta sistem proteksi overheating. Alat ini mampu mengeringkan helm standar dengan kadar air 40–50% dalam waktu sekitar 100 menit (tombol 2) atau 120 menit (tombol 1). Sensor LDR terbukti mampu mendeteksi perbedaan cahaya dan mengaktifkan alat secara otomatis dengan tegangan output bervariasi antara 0,05 V (gelap) hingga 3,62 V (terang). [7]

2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ainun Nidhar, Belyamin Sonki Prasetya, dan Dianta Mustofa Kamal pada Jurnal Rekayasa Mesin dengan judul “Perbandingan Kontrol Temperatur menggunakan Relay dan PID pada Oven Pengering berbasis Load Cell untuk Mengukur Kadar Air Buah”. Jurnal ini membandingkan performa kontrol suhu menggunakan sistem relay dan kontrol PID pada oven pengering berbasis load cell untuk mengukur kadar air buah secara otomatis sesuai SNI. Sistem ini menggunakan sensor thermocouple tipe-K, load cell, dan modul HX711. Thermocouple berfungsi untuk mendeteksi suhu di dalam oven secara real-time dan mengirimkan data ke mikrokontroler Arduino Atmega2560 guna menjaga suhu tetap pada titik setel. Load cell digunakan untuk mengukur perubahan massa buah selama proses pengeringan, yang menjadi dasar perhitungan kadar air, sementara modul HX711 berfungsi sebagai penguat sinyal dan konverter analog-ke-digital untuk membaca data dari load cell secara akurat. Hasil penelitian menunjukkan kontrol PID mode PI menjaga kestabilan suhu lebih baik $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dibanding relay. [8]
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Achmad Labib dan Puput Wanarti Rusimamto dalam Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering (INAJEEE) berjudul “Implementation of PID-Based Temperature Control System for Helmet Dryers”, studi ini mengkaji pengembangan serta penerapan sistem pengering helm otomatis yang menerapkan pengendalian suhu berbasis PID (Proportional–Integral–Derivative). Sistem tersebut dirancang untuk mempertahankan suhu pengeringan tetap stabil pada setpoint 45°C , terutama pada kondisi cuaca hujan yang menyebabkan helm cenderung basah dan lembap. Perangkat yang digunakan meliputi sensor DHT22 sebagai pembaca suhu dan kelembapan, mikrokontroler Arduino Uno sebagai unit kendali, serta driver BTS7960 dan MOSFET D4184 untuk mengontrol elemen pemanas dan kipas. Parameter PID ditentukan melalui metode Ziegler–Nichols dan selanjutnya disempurnakan melalui proses fine tuning hingga diperoleh nilai optimal $K_p = 100$, $K_i = 1$, dan $K_d = 114,6$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengeringkan helm dalam waktu 68 menit dengan tingkat kelembapan akhir 38,9%, serta memberikan respon sistem yang stabil ditandai

dengan overshoot 1,1%, kesalahan keadaan tunak 0°C, rise time 246 detik, dan settling time 561 detik, sehingga penerapan kontrol PID terbukti efektif dalam menjaga kestabilan suhu selama proses pengeringan.[6]

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kelembapan

Kelembapan merupakan besaran yang menyatakan kandungan uap air di dalam udara, yang dinyatakan sebagai kelembapan relatif (Relative Humidity/RH). Kelembapan relatif didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan uap air aktual di udara dengan tekanan uap air jenuh pada suhu tertentu, yang dinyatakan dalam satuan persen (%). Saat suhu udara naik, kapasitas udara menampung uap air bertambah, sehingga kelembapan relatifnya menurun meskipun jumlah uap airnya tetap. Dalam sistem pengering helm otomatis, kelembapan menjadi parameter utama untuk memantau tingkat kekeringan karena material interior helm yang higroskopis cenderung menyimpan air. Proses pengeringan dilakukan dengan menguapkan air melalui pemanasan dan sirkulasi udara, sehingga pengukuran RH secara kontinu sangat diperlukan guna memastikan proses pengeringan berjalan efektif, terkontrol, dan mencapai tingkat kekeringan yang diinginkan.[9]

Helm dapat dikatakan berada dalam kondisi kering apabila nilai kelembapan relatif telah mencapai kisaran $\leq 40\%$ RH, hal ini juga diperkuat dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan batas kelembapan 35% - 40% sebagai acuan helm telah kering.[6] Pada nilai ini, kandungan air pada busa dan lapisan interior helm sudah cukup rendah sehingga permukaan terasa kering, tidak lembap, dan relatif aman dari risiko pertumbuhan jamur maupun bakteri.[10] Sebaliknya, apabila nilai kelembapan masih berada di atas batas tersebut, helm dikategorikan masih lembap dan memerlukan proses pengeringan lanjutan. Nilai ambang 40% RH ini dapat digunakan sebagai threshold dalam sistem kendali untuk menentukan kondisi akhir proses pengeringan.

Selain kelembapan, suhu juga merupakan parameter penting dalam proses pengeringan helm. Suhu berfungsi untuk mempercepat penguapan air dari material interior helm. Pada alat pengering helm otomatis ini, suhu kerja alat diatur pada setpoint 50 °C. Pemilihan suhu setpoint ini bertujuan untuk menghasilkan proses pengeringan yang efektif tanpa menimbulkan kerusakan pada material helm, seperti busa, lapisan kain, cat, maupun stiker.[11] Dengan kombinasi pengendalian suhu pada setpoint 50 °C dan batas kelembapan kering sebesar 40% RH, sistem pengering helm otomatis dapat bekerja secara optimal, aman, dan efisien.

2.2.2 Sistem Kendali Otomatis

Menurut Yusron (2009:1) “Proses pengaturan atau pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran variabel, dan parameter sehingga berada pada suatu range tertentu”, sistem kendali otomatis merupakan suatu teknologi yang menghubungkan sistem mekanik, elektronika, dan listrik dalam sistem informasi yang berfungsi sebagai alat kontrol atau pengendali, Produk elektronika yang menggunakan sistem kendali otomatis menjadi sebuah alat yang dapat bekerja sesuai dengan kehendak penggunanya. Dengan demikian, pada sistem kendali otomatis yang akan digunakan pada alat pengering helm berfungsi untuk memastikan proses pengeringan berlangsung secara stabil, efisien, dan aman tanpa membutuhkan pengaturan manual dari pengguna [12].

Sebuah program intruksi yang terdapat pada suatu pengendalian yang menjalankan intruksi dan mengotomatiskan proses perintah memerlukan energi. Dalam mengerjakan proses dan mengoperasikan program serta kendali. Sistem pengendali menggunakan sensor DHT22 yaitu sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara simultan. Sensor ini bekerja dengan mengirimkan data digital secara periodik ke mikrokontroler melalui satu jalur komunikasi, sehingga proses pembacaan lebih akurat dan stabil dibandingkan sensor analog.

Dalam suatu sistem pengendali otomatis, seperti alat pengering helm otomatis, DHT22 menjadi peranan vital sebagai sumber informasi real-time mengenai kondisi lingkungan di dalam chamber pengering. Data suhu dan kelembapan yang terbaca

pada sensor akan dibandingkan dengan nilai setpoint yang diinginkan oleh sistem. Selain itu, metode control atau pengendali yang akan digunakan pada rancangan ini Adalah pengontrol PID controller [13].

2.2.3 Sistem Kontrol PID

Sistem kendali proportional integral and derivative (PID) merupakan salah satu ilmu kontrol yang telah banyak digunakan karena keandalannya dalam menyetabilkan suatu sistem. Dalam menstabilkan sistemnya kendali PID memerlukan error yang didapat kemudian merubahnya mejadi respon sistem hingga sistem tersebut dapat stabil secara otomatis. Sistem ini terdiri dari tiga metode pengaturan, yaitu Kontrol Proportional (P), Integral (I), dan Derivatif (D), di mana masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan tersendiri. Dalam praktiknya, ketiga metode ini dapat digunakan secara terpisah maupun dikombinasikan. Perancangan sistem kendali PID melibatkan penyesuaian parameter P, I, dan D agar respons keluaran sistem terhadap sinyal masukan dapat sesuai dengan yang diharapkan [14].

a. Proportional (P)

Parameter proportional membantu mempercepat respons sistem dengan menurunkan konstanta waktu sistem tertutup, namun tidak mengubah tingkat kompleksitas sistem karena outputnya tetap sebanding dengan input. Meskipun dapat mengurangi error pada keadaan tunak, parameter ini tidak mampu menghilangkannya sepenuhnya.[15] Fungsi utamanya adalah mendeteksi besar error dan memberikan sinyal koreksi yang sebanding dengan nilai error tersebut. Secara proportional dilambangkan dengan persamaan:

$$P_{out} = KP e$$

Dimana:

P_{out} = bagian *proportional* dari keluaran pengontrol.

KP = keuntungan *proportional*

e = *error*

b. Integral (I)

Parameter integral menghilangkan offset dengan meningkatkan orde sistem sebanyak satu tingkat. Meskipun mempercepat respons sistem, hal ini sering menyebabkan osilasi yang terus-menerus. Fungsi integral dalam kontrol PID bertujuan mengatasi keterbatasan kontrol proportional dengan mengevaluasi akumulasi error dari waktu ke waktu dan menyesuaikannya secara bertahap.[15] Penyesuaian ini diukur menggunakan reset rate, yaitu parameter berbasis waktu yang menunjukkan seberapa cepat koreksi integral dilakukan.

$$I_{out} = \frac{1}{T_i} \int e \cdot dt = K_I \int e \cdot dt$$

Dimana:

I_{out} = bagian *integral* dari keluaran pengontrol

T_i = waktu reset atau waktu *integral*

K_I = keuntungan *integral*

e = *error*

c. Derivatif (D)

Pengaturan derivatif berfungsi untuk meredam osilasi pada sistem, tanpa memengaruhi offset maupun tingkat kompleksitas sistem. Komponen ini bekerja dengan menganalisis kecepatan perubahan error, sehingga menghasilkan respons yang kuat terhadap perubahan mendadak. Namun, jika nilainya terlalu tinggi, justru bisa menyebabkan kontrol menjadi tidak stabil atau menghasilkan overshoot yang berlebihan.[15] Hal ini dilambangkan dengan persamaan:

$$D_{out} = T_d \frac{d}{dt} e = K_d \frac{d}{dt} e$$

Dimana:

D_{out} = bagian *derivatif* dari keluaran pengontrol

T_d = waktu *derivatif*

K_d = keuntungan *derivatif*

e = *error*

Elemen-elemen kontroller P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan agar mempercepat reaksi sebuah system, menghilangkan error atau offset dan memberikan respon awal atau hasil yang cepat. Pada kontrol PID disebut demikian karena output pengendalinya dijumlahkan menjadi tiga parameter, term proposional, integral, dan derivative digabung dan dihitung bersama untuk menghasilkan luaran akhir dari kontroler PID. Ketiga parameter ini pada error (e), yaitu selisih antara parameter input dan output.[15] Penyetelan yang tepat terhadap parameter parameter tersebut akan menghasilkan reaksi dinamis suatu sistem, mengurangi overshoot, menghilangkan kesalahan (steady-state), dan meningkatkan kestabilan proses. Hubungan ini dijelaskan dengan persamaan rumus output kontroler PID di bawah ini:

$$output = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Dimana K_P , K_I , dan K_D masing-masing adalah parameter dari P, I, dan D. Parameter K_I dan K_D dapat juga representasikan dalam persamaan di bawah ini:

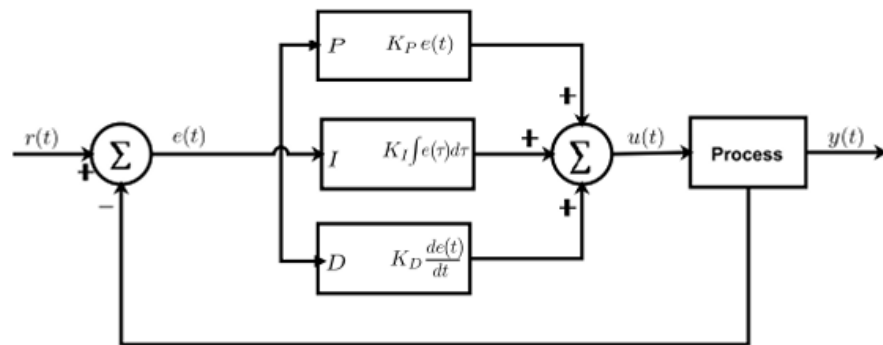
$$K_I = K_p \frac{1}{T_i}, K_D = K_p \cdot T_d$$

Dimana:

T_i = waktu reset

T_d = waktu yang ditentukan

Keluaran kontroller PID merupakan jumlahan dari keluaran kontroler proportional, keluaran kontroler integral. Gambar 2.1 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 2. 1 Struktur Sistem Kontrol PID

Gambar 2.1 menunjukkan struktur sistem kontrol PID bekerja dalam konfigurasi loop tertutup (*closed-loop system*) yang diawali oleh sinyal referensi $r(t)$. Sinyal ini dibandingkan dengan sinyal keluaran sistem $y(t)$ pada blok penjumlah (Σ) untuk menghasilkan sinyal error $e(t)$. Error tersebut didefinisikan sebagai selisih antara nilai referensi dan nilai keluaran aktual sistem, sehingga mencerminkan seberapa jauh kondisi sistem menyimpang dari kondisi yang diinginkan.

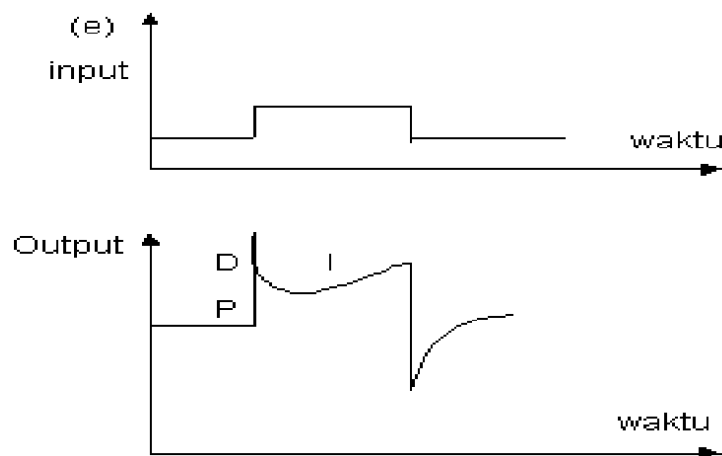
Sinyal error $e(t)$ selanjutnya diproses secara paralel oleh tiga komponen pengendali PID. Komponen Proportional (P) menghasilkan sinyal kendali yang sebanding dengan besar error, yaitu $K_p e(t)$ yang berfungsi mempercepat respon sistem terhadap perubahan error. Komponen Integral (I) menghitung integral dari error terhadap waktu, yaitu $K_i \int e(t) dt$, yang bertujuan untuk menghilangkan error steady-state dengan mengakumulasi kesalahan yang terjadi secara kontinu. Sementara itu, komponen Derivative (D) menghasilkan sinyal kendali berdasarkan laju perubahan error, yaitu $K_d \frac{de(t)}{dt}$, yang berperan dalam meningkatkan stabilitas sistem dengan meredam osilasi serta mengantisipasi perubahan error yang cepat. Keluaran dari ketiga komponen

tersebut kemudian dijumlahkan pada blok penjumlah kedua untuk membentuk sinyal kendali total $e(t)$. Secara matematis, sinyal kendali ini dapat dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Sinyal kendali $u(t)$ selanjutnya diberikan sebagai masukan ke proses atau plant yang dikendalikan, sehingga memengaruhi dinamika sistem secara langsung. Proses atau plant akan menghasilkan keluaran sistem $y(t)$ sebagai respon terhadap sinyal kendali yang diberikan. Keluaran ini kemudian diumpan balikkan ke blok pembanding sebagai sinyal feedback, sehingga sistem secara terus-menerus melakukan koreksi terhadap error yang terjadi. Dengan mekanisme umpan balik ini, kontrol PID mampu mengatur respon sistem agar mendekati setpoint, meminimalkan error, serta menghasilkan performa sistem yang stabil, cepat, dan akurat sesuai dengan parameter pengendali yang digunakan.

Keluaran controller PID menciptakan jumlahan dari keluaran kontroler proportional, keluaran kontroler integral. Gambar 2.2 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 2. 2 Kurva antara sinyal output dengan input controller PID

Karakteristik dari kontroler PID sangat bergantung pada seberapa besar kontribusi dari masing-masing komponen P, I, dan D. Penyesuaian nilai konstanta K_p (proportional), T_i (integral), dan T_d (derivatif) akan memunculkan pengaruh dominan dari elemen tertentu. Salah satu atau dua konstanta dapat disetel lebih besar dari yang lain, dan komponen yang paling dominan tersebut akan memberikan pengaruh terbesar terhadap kinerja sistem secara keseluruhan[15].

2.2.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan komputer kecil yang terintegrasi di dalam satu *Integrated Circuit* (IC) tunggal. Perangkat ini memiliki arsitektur yang komprehensif, mencakup seluruh unit fungsional inti yang diperlukan untuk membentuk suatu sistem terpadu. Komponen utama mikrokontroler meliputi Unit Pemroses Sentral (CPU), memori kerja (RAM), memori program (ROM), Timer dan Counter, Saluran Komunikasi Serial dan Paralel, Port *Input/Output*, serta konverter Analog-ke-Digital (ADC) dan Digital-ke-Analog (DAC)[16]. Secara operasional, mikrokontroler bekerja dengan menerima sinyal dari perangkat input, memproses data tersebut berdasarkan instruksi yang tersimpan, dan kemudian

menghasilkan sinyal *output* yang digunakan untuk mengendalikan perangkat keras atau aktuator lainnya.

2.2.3.1 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan papan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi elektronika, otomasi, dan sistem tertanam. Board ini berbasis mikrokontroler ATmega328P yang telah dilengkapi dengan rangkaian pendukung seperti regulator tegangan, oscillator, konektor I/O, serta port komunikasi, sehingga dapat langsung digunakan untuk keperluan pemrograman dan pengendalian rangkaian[16]. Arduino Uno dirancang agar mudah dipelajari, fleksibel digunakan, serta kompatibel dengan banyak modul dan sensor, membuatnya menjadi salah satu platform paling populer untuk proyek pendidikan hingga prototipe industri.

Arduino Uno dapat diprogram menggunakan bahasa C/C++ melalui Arduino IDE, yang menyediakan library standar serta fungsi-fungsi siap pakai untuk memudahkan pengembangan program. Selain itu, platform ini mendukung berbagai environment lain seperti PlatformIO maupun Atmel Studio. Kemudahan dalam pemrograman serta dokumentasi yang lengkap menjadikan Arduino Uno sering dipilih untuk sistem otomatisasi sederhana hingga sistem kontrol seperti PID yang digunakan dalam tugas akhir ini. Secara performa, Arduino Uno mengandalkan mikrokontroler 8-bit ATmega328P dengan frekuensi clock 16 MHz, RAM sebesar 2 KB, EEPROM 1 KB, dan flash memory 32 KB untuk menyimpan program. Meskipun spesifikasinya lebih sederhana dibandingkan mikrokontroler modern seperti ESP32, Arduino Uno tetap mampu menangani proses pembacaan sensor, pengendalian aktuator, serta komunikasi serial secara efisien, terutama untuk sistem yang tidak membutuhkan komputasi kompleks[16].

Arduino Uno menyediakan berbagai fitur penting seperti pin digital, pin analog, PWM, SPI, I2C, dan UART, yang memungkinkan integrasi dengan beragam sensor dan modul. Dalam konteks tugas akhir ini, Arduino Uno berperan sebagai pusat kendali yang memproses data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22, kemudian mengatur intensitas pemanas PTC serta kipas AC melalui modul

Table 2. 2 Pin Out Arduino Uno

Pin	Keterangan
VIN	Input tegangan 7–12V dari adaptor/batre
5V	Output tegangan stabil 5V.
3.3V	Output 3.3V maks 50mA
GND	Ground (0V)
RESET	Untuk reset mikrokontroler
D0 (RX)	Serial Receive.
D1 (TX)	Serial Transmit
D2	External Interrupt 0
D3	PWM, Interrupt 1
D4, D7, D8	I/O biasa
D5, D6, D9	PWM
D10	WM, SPI SS
D11	PWM, SPI MOSI
D12	SPI MISO
D13	LED internal, SPI SCK.
A0-A5	Input analog 10-bit (0–1023)
A4 (SDA)	I2C Data
A5 (SCL)	I2C Clock
AREF	Referensi untuk ADC
IOREF	Outpun tegangan referensi board

2.2.3.2 Arduino IDE

Perancangan perangkat lunak pada tugas akhir ini dilaksanakan sepenuhnya menggunakan Arduino IDE (Integrated Development Environment), yaitu lingkungan pengembangan terpadu resmi yang disediakan oleh Arduino. Arduino IDE berfungsi sebagai platform utama yang mengintegrasikan seluruh proses

pengendalian, mulai dari pengelolaan sinyal input yaitu sensor hingga aktivasi output atau aktuator dalam sistem otomatisasi [17].

Melalui perangkat lunak ini, penulis dapat melakukan penulisan, kompilasi, dan proses unggah (upload) kode program ke dalam mikrokontroler Arduino. Bahasa pemrograman yang digunakan untuk menyusun kode adalah Bahasa C, yang telah dimodifikasi menyerupai C++ standar. Untuk memastikan interaksi dan komunikasi antara sistem dan pengguna, digunakan tombol sebagai perangkat input untuk mengatur parameter sistem kendali otomatis, dan hasil pengaturan serta kondisi sistem (monitoring) kemudian ditampilkan melalui layar LCD.



Gambar 2. 4 Bentuk Fisik dari Software Arduino IDE

2.2.5 Sensor DHT22

Sensor DHT22 adalah sensor digital yang dirancang khusus untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara simultan[18]. Sensor ini dipilih karena stabilitas tinggi dan fitur kalibrasi internal yang memudahkan perolehan data akurat. Kemudahan implementasinya didukung oleh Arduino Uno, sebagai papan mikrokontroler open-source, yang menawarkan antarmuka pemrograman sederhana untuk integrasi sensor.

Berdasarkan hasil pengujian komparatif, DHT22 menunjukkan tingkat akurasi yang lebih unggul dibandingkan Sensor DHT11. DHT22 mencatatkan kesalahan relatif pengukuran suhu sebesar 4% dan kelembapan sebesar 18%.

Meskipun kesalahan kelembapan masih signifikan, rentang ini jauh lebih rendah dibandingkan DHT11 (kesalahan suhu 1-7% dan kelembapan 11-35%. Keunggulan DHT22 dalam hal akurasi dan presisi menjadikannya pilihan optimal, yang dapat dianalisis lebih lanjut melalui perhitungan simpangan bak[18].

Dengan demikian, Sensor DHT22 memegang peran fundamental sebagai sumber informasi real-time mengenai kondisi lingkungan di dalam box pengering helm. Data lingkungan yang akurat ini menjadi basis bagi mikrokontroler untuk mengambil keputusan pengendalian yang kemudian diolah dalam algoritma PID. Ketepatan pengukuran yang tinggi dari sensor ini sangat mendukung stabilitas dan efektivitas sistem secara keseluruhan, memastikan suhu dan kelembapan dipertahankan dalam rentang ideal untuk proses pengeringan helm.



Gambar 2. 5 Sensor DHT22

Table 2. 3 Spesifikasi Sensor DHT22

Spesifikasi	Keterangan
Voltage Input	3 – 5 V
Signal Output	Pulsing Digital Signal, 5V
Current Comsumption Consumption	2.5 mA
Range Temperature	-40°C - 125°C(+/- 0.5C)
Range Humidity	0 – 100% (+/-2-5%)
Berat	10- gram

2.2.6 PTC Heater

PTC Heater (Positive Temperature Coefficient Heater) merupakan elemen pemanas berbasis material semikonduktor, seperti Barium Titanate, yang memiliki karakteristik unik: resistansi termal positif resistansi meningkat seiring kenaikan suhu. Ketika elemen dalam kondisi dingin, resistansi sangat rendah, memungkinkan aliran arus yang besar dan mempercepat produksi panas. Namun, saat suhu elemen mencapai titik Curie (suhu kerja yang dirancang), resistansi meningkat tajam, menyebabkan arus otomatis menurun.[19]

Karakteristik self-regulating ini merupakan keunggulan utama, karena mampu mencegah overheating tanpa memerlukan kontrol suhu eksternal yang kompleks, berbeda dengan elemen pemanas NiCr. Prinsip kerjanya didasarkan pada konsep koefisien suhu positif, di mana peningkatan resistansi membatasi arus yang mengalir, sehingga output panas distabilkan pada kondisi yang diinginkan. Cara kerjanya: energi listrik dikonversi menjadi energi termal. Ketika suhu naik hingga titik kerja, resistansi bertambah, membatasi arus dan menstabilkan panas pada nilai maksimum yang aman. Jika suhu menurun, resistansi kembali mengecil dan arus bertambah untuk menjaga keseimbangan. Mekanisme otomatis ini sangat efektif diaplikasikan pada alat pengering helm untuk mempertahankan suhu pengeringan yang aman, stabil, serta efisien energi tanpa memerlukan intervensi manual yang berkelanjutan.



Gambar 2. 6 PTC Heater

Table 2. 4 Spesifikasi PTC Heater

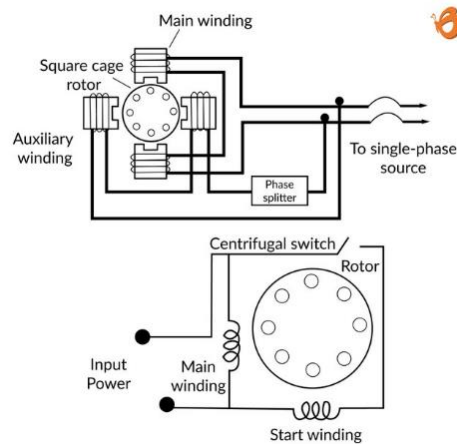
Spesifikasi	Keterangan
Material	Keramik PTC + Nilon
Benang (Thread)	PTFE (Polytetrafluoroethylene)
Material Pemanas	Keramik PTC (Koefisien Suhu Positif)
Bahan Luar	Nylon 66 (nilon tahan panas yang diperkuat)
Umur Kipas	>20.000 jam
Daya Keluaran	300 watt

2.2.5 Kipas Angin AC

Kipas angin AC adalah perangkat elektromekanis yang berfungsi mengkonversi energi listrik AC menjadi energi mekanik berupa gerakan putar baling-baling untuk menghasilkan aliran udara. Inti perangkat ini adalah motor listrik AC (motor induksi), yang terdiri dari stator (kumparan berinsulasi) dan rotor. Ketika stator dialiri arus AC, ia menghasilkan medan magnet yang polaritasnya berubah secara periodik. Perubahan medan ini menciptakan gaya elektromagnetik yang menginduksi putaran pada rotor yang terhubung ke poros.

Putaran rotor menggerakkan bilah kipas yang dirancang secara aerodinamis, yang kemudian mendorong udara secara konsisten untuk menciptakan aliran. Dalam konteks termal, mekanisme ini menghasilkan efek pendinginan tidak dengan menurunkan suhu udara secara langsung, melainkan dengan meningkatkan sirkulasi udara dan mempercepat proses penguapan. Keunggulan utama motor induksi AC terletak pada konstruksinya yang sederhana, daya tahan tinggi, dan minim perawatan karena tidak menggunakan sikat karbon seperti motor DC. Fleksibilitas ini, ditambah ketersediaan dalam berbagai jenis (aksial, sentrifugal, sirkulasi), menjadikannya ideal untuk operasi berkelanjutan[20].

Dalam aplikasi alat pengering helm otomatis, kipas angin AC menjadi komponen yang sangat relevan. Kipas ini bertugas mendedarkan udara hangat, mengeluarkan kelembapan, dan menjaga sirkulasi udara merata sehingga proses pengeringan helm dapat berjalan efisien dan optimal.



Gambar 2. 7 Motor Induksi Kipas Angin

Table 2. 5 Spesifikasi Kipas Angin

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Kerja	AC 220-240 V
Arus	0,08 A
Kecepatan Putaran	2.300 RPM
Tingkat Kebisingan	31 dBA
Frekuensi	50/60Hz.
Jumlah Baing-baling	7 buah baling-baling
Material	Logam/Besi (bodi dan bilah kipas)

2.2.6 Power Supply

Catu daya (Power Supply) merupakan komponen fundamental yang bertindak sebagai penyedia energi listrik bagi keseluruhan rangkaian sistem elektronika. Fungsi utamanya adalah mengkonversi sumber listrik jaringan arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) dengan level tegangan dan arus yang spesifik. Proses konversi ini melibatkan serangkaian tahapan esensial: transformasi tegangan, penyearahan (rectification) dari AC ke DC, penyaringan

(filtering) untuk meminimalisir ripple, dan regulasi untuk memastikan kestabilan tegangan output[21].

Power Supply juga memiliki peran vital sebagai pondasi keamanan dan stabilitas sistem. Dalam konteks proyek otomatisasi berbasis mikrokontroler, seperti alat pengering helm, Power Supply menjamin bahwa seluruh komponen, termasuk mikrokontroler, sensor, aktuator (heater, kipas, relay), dan perangkat output (LCD, buzzer), menerima suplai tegangan DC yang stabil dan aman sesuai spesifikasi teknisnya. Tanpa Power Supply yang memadai, kualitas operasi sistem akan terganggu, berpotensi menyebabkan ketidakakuratan sensor, inkonsistensi aktuator, hingga risiko kerusakan komponen. Oleh karena itu, pemilihan dan perancangan Power Supply yang tepat merupakan aspek fundamental untuk menjamin konsistensi, keandalan, dan efektivitas operasional sistem secara keseluruhan.



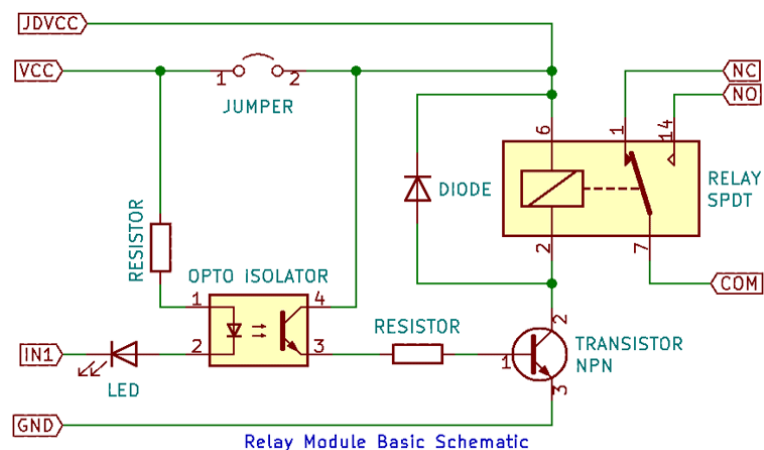
Gambar 2. 8 Power Supply

Table 2. 6 Spesifikasi Power Supply

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Input	110V/220V $\pm 15\%$
Tegangan Output	DC 12V 10A
Konsumsi Daya	36 Watt
Jenis Konektor	5.5mm x 2.5mm untuk DC
Material Casing	Plat besi berlubang (jaring) untuk sirkulasi udara

2.2.7 Modul Relay

Modul Relay adalah komponen elektromekanik yang berfungsi sebagai saklar listrik yang dapat dikendalikan secara elektrik. Di dalam relay terdapat kumparan elektromagnetik (coil), sebuah armature (tuas logam yang bisa bergerak), pegas pemulih, serta kontak saklar tetap (fixed contacts) dan kontak saklar bergerak (moving contact). Kontak saklar terdiri dari terminal umum (COM), dan dua kondisi kontak: Normally Open (NO) yaitu kontak yang terbuka saat relay tidak diaktifkan, dan Normally Closed (NC) kontak yang tertutup saat relay tidak diaktifkan.



Gambar 2. 9 Rangkaian Modul Relay

Prinsip kerja relay didasarkan pada efek elektromagnetik: ketika arus listrik diberikan ke coil misalnya berupa sinyal kontrol dari mikrokontroler coil akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini kemudian menarik armature sehingga armature bergerak dan mengubah posisi kontak saklar. Jika kontak bergerak dari posisi NC ke NO, maka sirkuit beban (yang biasanya memiliki tegangan atau arus lebih besar) menjadi tertutup, sehingga arus dapat mengalir ke beban misalnya heater, motor, kipas, lampu, atau perangkat lain. Sebaliknya, ketika arus coil diputus (sinyal kontrol dihapus), medan magnet hilang, pegas kembali menarik armature ke posisi semula, kontak NO kembali terbuka (atau NC tertutup), sehingga sirkuit beban terputus[22].

Dengan demikian, relay memungkinkan sebuah sirkuit kontrol berdaya rendah misalnya output digital 5 V dari mikrokontroler untuk mengendalikan sirkuit daya lebih tinggi secara aman dan terisolasi. Karena modul relay biasanya sudah dilengkapi transistor driver atau rangkaian pendukung lain serta terminal output beban, maka pengguna tidak perlu merancang driver sendiri cukup sambungkan sinyal kontrol ke input modul relay, dan sambungkan beban ke terminal NO–COM atau NC–COM sesuai kebutuhan[22]. Hal ini membuat modul relay sangat praktis untuk aplikasi otomatisasi.

Dalam implementasi pada proyek otomatis seperti alat pengering helm otomatis, modul relay menjadi komponen kunci: mikrokontroler Arduino Uno dapat mengendalikan heater atau kipas blower menggunakan modul relay berdasarkan data sensor (misalnya suhu/kelembapan). Ketika kondisi chamber pengering belum mencapai setpoint, Arduino mengirim sinyal HIGH ke relay → coil aktif → kontak tertutup → heater/kipas menyala; setelah suhu/kelembapan tercapai, Arduino memutus sinyal → coil mati → kontak terbuka → heater/kipas mati. Dengan cara ini, proses pengeringan berlangsung otomatis, aman, dan terkontrol tanpa intervensi manual.



Gambar 2. 10 Modul Relay

Table 2. 7 Spesifikasi Modul Relay

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasi (Coil)	5V DC
Kapasitas Kontak Beban	250VAC 10A atau 30VDC 10A

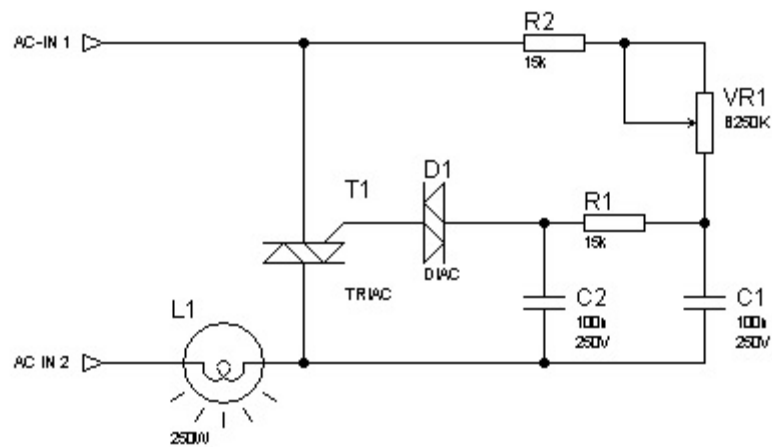
Arus Pemicu (Trigger Current)	5mA
Frekuensi Resonansi	2600 Hz
Tegangan Sinyal Pemicu	3.3V – 5V

Table 2 8 Pin Out Modul Relay

Pin	Keterangan
VCC	Tegangan Input
GND	Ground
IN1	Menerima sinyal pemicu (High/Low)
JD - VCC	catu daya terpisah untuk isolasi optik penuh
COM	Terminal pusat yang terhubung ke beban
NO (Normally Open)	Akan tersambung saat relay ON
NC (Normally Closed)	Akan terputus saat relay ON

2.2.8 Dimmer AC

Modul Dimmer merupakan rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengatur besaran tegangan efektif dan bentuk gelombang dari arus listrik bolak-balik (AC). Perangkat ini terdiri dari komponen pasif seperti resistor, kapasitor, dan potensiometer, serta komponen semikonduktor kunci, yaitu DIAC (Diode for Alternating Current) dan TRIAC (Triode for Alternating Current). Dalam mekanisme kerjanya, TRIAC sebagai semikonduktor tiga terminal (MT1, MT2, dan Gate) berperan sebagai sakelar utama yang memungkinkan aliran arus dua arah ketika dipicu melalui terminal Gate. Sementara itu, DIAC sebagai komponen semikonduktor simetris dua terminal berfungsi sebagai pemicu tegangan untuk mengaktifkan TRIAC. DIAC akan mengirimkan pulsa pemicu ke Gate TRIAC segera setelah tegangan pada kapasitor mencapai ambang batas tertentu, sehingga mengatur sudut pemotongan gelombang AC (phase-cutting)[23].



Gambar 2. 11 Rangkaian Dimmer

Gambar 2.10 menjelaskan cara kerja Modul Dimmer AC dalam mengatur daya dimulai dengan pembatasan aliran arus menuju rangkaian pengatur waktu melalui kombinasi resistor dan potensiometer. Aksi ini secara langsung memperlambat laju pengisian muatan pada kapasitor. Setelah kapasitor berhasil terisi hingga mencapai tegangan tertentu yang telah disinkronkan dengan titik nol gelombang AC, muatan tersebut akan disalurkan ke DIAC (Diode for Alternating Current). Ketika tegangan pada DIAC melampaui batas tegangan ambang minimumnya, DIAC akan segera menghantarkan arus pulsa menuju terminal Gate pada TRIAC (Triode for Alternating Current)[23]. Pulsa pemicu ini menyebabkan TRIAC menjadi aktif (ON), memungkinkan arus utama mengalir ke beban (pemanas). Dengan memvariasikan waktu pengisian kapasitor menggunakan potensiometer, durasi ON TRIAC dapat diatur, sehingga secara efektif mengendalikan tegangan RMS (Root Mean Square) dan daya yang dihantarkan ke aktuator (PTC Heater).



Gambar 2. 12 Modul AC Light Dimmer

Table 2. 9 Spesifikasi Modul AC Light Dimmer

Spesifikasi	Keterangan
Pembuat	RobotDyn
Tipe TRIAC	Tri-Ad BTA16
Maksimal beban arus AC	5A
AC Voltage	110V / 220V
AC Frequency	50/60Hz.
Input pin	TTL level 3,3V to 5V
Ukuran	63mm x 30mm x 30mm

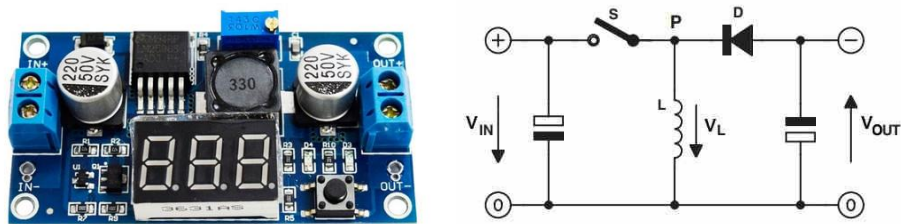
Table 2. 10 Pin Out Modul AC Light Dimmer

Pin	Keterangan
VCC	Tegangan Input
GND	Ground
ZNC	Pin output deteksi titik nol AC
PWM / PSM	Pin input untuk mengatur tingkat peredupan
AC-IN (L)	Input fasa dari sumber listrik PLN
AC-IN (N)	Input netral dari sumber listrik PLN
LOAD (L)	Output fasa yang sudah diredupkan

2.2.9 Buck Converter / Modul LM2596

Buck Converter merupakan salah satu jenis konverter DC-ke-DC yang memiliki fungsi fundamental untuk menurunkan tegangan searah (DC) dari nilai masukan yang lebih tinggi menjadi nilai keluaran yang lebih rendah sesuai kebutuhan sistem. Tegangan masukan untuk konverter daya elektronika ini umumnya bersumber dari catu daya (power supply) atau baterai.

Prinsip kerja Buck Converter didasarkan pada pengaturan siklus ON dan OFF sakelar internal secara cepat dan berulang, yang dikendalikan oleh sinyal PWM (Pulse Width Modulation). Ketika sakelar menyala (ON), arus mengalir dari sumber ke beban sekaligus mengisi energi pada induktor; sebaliknya, ketika sakelar mati (OFF), induktor melepaskan energi yang tersimpan, mempertahankan aliran arus ke beban melalui dioda. Dengan memvariasikan siklus kerja (duty cycle) yaitu rasio waktu ON terhadap total waktu siklus tegangan keluaran dapat diatur agar selalu lebih kecil daripada tegangan masukan, sehingga memenuhi spesifikasi tegangan yang diperlukan oleh komponen sistem[24]. Pada alat ini input IN(+) dihubungkan ke output power supply 12V, sedangkan input IN(-) dihubungkan ke output netral power supply. Setelah melewati modul lm2596 tegangan akan turun menjadi 5V, lalu pin OUT(+) dihubungkan ke 5V arduino uno sebagai sumber sedangkan pin OUT(-) dihubungkan ke ground pada arduino.



Gambar 2. 13 Modul LM2596

Table 2. 11 Spesifikasi Modul LM2596

Spesifikasi	Keterangan
Tipe	Buck Converter (Step-down Regulator)
Tegangan Input Maksimum	40V DC
Tegangan Output	1,23 V – 37 V DC (sesuaikan potensiometer)
Arus Output Maksimum	3 A (maksimal, tergantung pendinginan)
Frekuensi Switching	150 kHz
Efisiensi	Hingga 92%
Ripple Output	≤ 30 mV
Ukuran Modul	Sekitar 43 mm x 21 mm x 14 mm

2.2.10 Buzzer

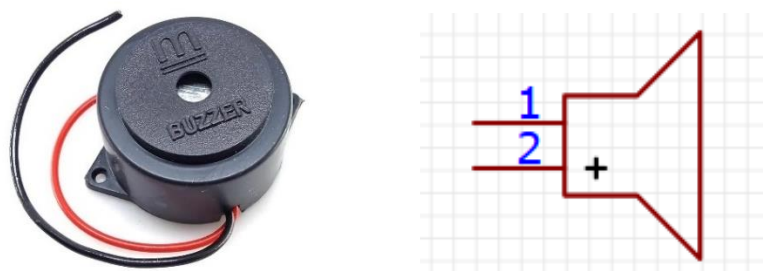
Buzzer adalah komponen elektronik yang berfungsi sebagai perangkat output suara, ketika diberikan tegangan atau sinyal tertentu, buzzer mengubah energi listrik menjadi getaran suara yang dapat didengar manusia. Buzzer sering digunakan sebagai indikator atau alarm sederhana, misalnya untuk memberi tanda bahwa suatu proses telah selesai, terjadi kesalahan, atau sebagai peringatan[25].

Pada buzzer terdapat elemen keramik piezo di dalamnya ketika tegangan listrik (alternating atau pulsa) diberikan ke elemen ini, elemen tersebut akan mengalami deformasi mekanik meregang dan menyusut secara cepat sehingga menghasilkan getaran. Getaran ini kemudian menjalar melalui membran atau diafragma, dan menghasilkan gelombang suara di udara. Karena prinsip ini, buzzer dapat menghasilkan suara dengan frekuensi yang sesuai dengan desainnya, membuatnya cocok sebagai alarm atau pemberi notifikasi.

Buzzer memiliki beberapa kelebihan yang membuatnya populer untuk proyek elektronika sederhana. Pertama, mereka berukuran kecil, ringan, dan relatif murah. Kedua, konsumsi daya buzzer cukup rendah sehingga cocok untuk sistem mikrokontroler seperti Arduino. Ketiga, kemudahan integrasinya hanya memerlukan tegangan input (sering 3–12 V) dan sebuah pin output digital/pulsa

dari mikrokontroler untuk menghasilkan suara. Oleh karena itu, buzzer banyak dipakai sebagai alarm, indikator proses, timer, pemberi notifikasi kesalahan, dan berbagai aplikasi otomatisasi atau alat elektronik[25].

Dengan demikian, memasukkan buzzer dalam sistem otomatis (misalnya alat pengering helm otomatis, alat alarm, alat kontrol, dsb.) akan memberikan kemudahan dalam memberikan umpan balik suara kepada pengguna misalnya memberitahukan bahwa proses pengeringan telah selesai, atau kondisi chamber sudah mencapai setpoint secara sederhana, efisien, dan ekonomis. Pada alat pengendali suhu ini buzzer digunakan sebagai indikator alat sedang dimulai dan alat telah selesai bekerja. Untuk memastikan buzzer bekerja, pada pin (+) buzzer kita hubungkan ke inputan 5V dari arduino dan untuk inputan (-) dihubungkan ke pin 8 pada arduino uno melalui transistor yang berfungsi sebagai saklar elektronik (switch) untuk mengalirkan arus yang lebih besar ke buzzer.



Gambar 2. 14 Buzzer

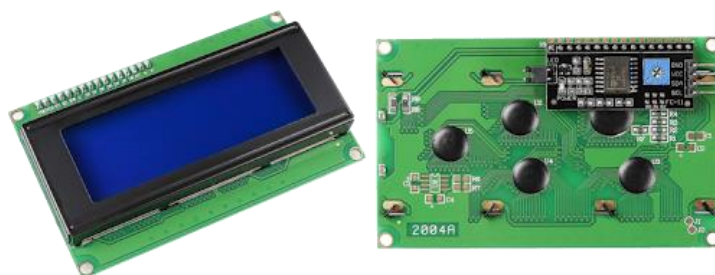
Table 2. 12 Spesifikasi Buzzer

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Kerja	5V
Konsumsi Arus	30mA
Tingkat Kenyaringan	87 dB
Frekuensi Resonansi	2600 Hz
Temperatur Kerja	-20°C – 85°C
Dimensi	12 x 7.5 mm

2.2.11 LCD 20x4

LCD (Liquid Crystal Display) 20x4 merupakan modul tampilan karakter yang mampu menampilkan hingga 20 karakter dalam 4 baris, sehingga total informasi yang dapat disajikan mencapai 80 karakter. Teknologi ini bekerja berdasarkan sifat kristal cair yang dapat memodulasi cahaya ketika diberikan tegangan listrik, sehingga karakter dapat muncul melalui pengaturan titik-titik pada matriks tampilan. LCD 20x4 biasanya menggunakan driver seperti HD44780 atau driver kompatibel, yang mendukung metode komunikasi 4-bit maupun 8-bit untuk memudahkan integrasi dengan mikrokontroler. Selain itu, modul LCD ini dilengkapi backlight untuk memastikan tulisan tetap terlihat jelas dalam kondisi cahaya rendah serta potensiometer untuk pengaturan tingkat kontras tampilan[26].

Dalam sistem pengering helm otomatis berbasis mikrokontroler, LCD 20x4 berperan penting sebagai antarmuka informasi (user interface) yang memberikan notifikasi dan data secara real-time kepada pengguna. Informasi yang ditampilkan antara lain suhu dan kelembapan di dalam chamber pengering yang diperoleh dari sensor, status proses pengeringan, waktu operasi, hingga pesan peringatan atau instruksi saat alat telah berhasil menyelesaikan proses. Dengan kapasitas tampilan yang lebih besar dibandingkan LCD 16x2, LCD 20x4 mampu menampilkan lebih banyak parameter sekaligus, sehingga pengguna dapat memantau kondisi alat secara akurat dan mudah tanpa harus menekan tombol atau menggunakan media tambahan.



Gambar 2. 15 LCD I2C 20x4

Table 2. 13 Spesifikasi LCD I2C 20x4

Spesifikasi	Keterangan
Jenis LCD	LCD 20x4, OLED, TFT
Tipe Komunikasi	Paralel (4-bit/8-bit) / I2C / SPI
Resolusi Karakter	20x4 (20 kolom, 4 baris)
Tegangan Operasional	5V DC (20x4) / 3.3V atau 5V (OLED,TFT)
Komunikasi Daya	$\pm 2\text{mA}$ (tanpa backlight), $\pm 25\text{mA}$
Antarmuka I2C	SDA (A4), SCL (A5) pada Arduino Uno

Table 2. 14 Pin Out LCD I2C 20x4

Pin	Keterangan
VCC	Tegangan input
GND	GND
SDA	Jalur data I2C
SCL	Jalur clock I2C.

2.2.13 Exhaust Fan DC

Exhaust fan DC merupakan perangkat aktuator yang berfungsi untuk mengalirkan dan membuang udara dari suatu ruang tertutup dengan memanfaatkan sumber tegangan searah (Direct Current) sebesar 5 volt. Exhaust fan ini umumnya menggunakan motor DC tipe brushless (BLDC) yang memiliki efisiensi tinggi, konsumsi daya rendah, serta umur pakai yang lebih panjang. Ketika tegangan DC diberikan, motor menghasilkan medan magnet yang menyebabkan rotor berputar dan menggerakkan baling-baling kipas. Putaran baling-baling tersebut menciptakan perbedaan tekanan antara bagian dalam dan luar ruang, sehingga udara panas dan lembap terdorong keluar dan digantikan oleh udara yang lebih segar dari lingkungan sekitar[27].

Prinsip kerja exhaust fan DC didasarkan pada konversi energi listrik menjadi energi mekanik yang menghasilkan aliran udara secara terkontrol. Besarnya aliran udara bergantung pada kecepatan putaran motor, yang dapat diatur melalui perubahan tegangan atau menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM) dari mikrokontroler. Dengan pengaturan ini, exhaust fan mampu bekerja secara adaptif sesuai kebutuhan sistem. Pada aplikasi alat pengering helm otomatis, exhaust fan ini berperan penting dalam menjaga sirkulasi udara dan membuang kelembapan hasil pengeringan, sehingga proses pengeringan berlangsung lebih cepat, merata, dan efisien. Selain itu, penggunaan exhaust fan bertegangan rendah meningkatkan keamanan sistem serta memudahkan integrasi dengan rangkaian kontrol berbasis mikrokontroler[27].



Gambar 2. 16 Exhaust Fan DC

Table 2. 15 Spesifikasi Exhaust Fan DC

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasi	5V DC
Jumlah Baing	7 buah
Arus	0.1A
Ukuran	4cm x 4cm
Material	Plastik (94V UL)