

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Setelah dilakukan kajian literatur yang bersumber dari berbagai konferensi internasional, jurnal ilmiah, dan paper penelitian, diperoleh sejumlah penelitian terdahulu yang menjadi referensi dan inspirasi. Beberapa penelitian yang dimaksud antara lain sebagai berikut:

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

NO	Judul Penelitian	Keterangan	Perbaikan
1	<i>Emerging Trends and Challenges in Thermal Management of Power Electronic Converters: A State Of The Art Review</i> – Rahman et al. (2024)[3]	Penelitian membahas berbagai metode <i>thermal management</i> pada konverter elektronika daya. Temperatur dan siklus termal pada power semiconductor menjadi parameter penting yang berkaitan dengan <i>reliability</i> dan <i>lifetime</i> .	Penelitian ini menerapkan <i>thermal management</i> dalam skala kendaraan listrik ringan dengan melakukan monitoring temperatur pada driver motor dan mengendalikan dua kipas berdasarkan keluaran <i>fuzzy Mamdani</i> .
2	<i>Forced Air Cooled Heat Sink with Uniformly Distributed Temperature of Power Electronic Modules</i> – Bünnagel et al. (2021)[4]	Penelitian membahas <i>forced-air cooling</i> pada modul elektronika daya. Distribusi aliran udara memengaruhi temperatur komponen dan efektivitas pendinginan power semiconductor.	Konsep <i>forced-air cooling</i> diterapkan pada driver motor BLDC menggunakan dua fan yang mengarahkan udara menuju driver dan dikendalikan melalui PWM.

Tabel 2.2 Lanjutan Tinjauan Pustaka

NO	Judul Penelitian	Keterangan	Perbaikan
3	<i>New Analytical Model for Real-Time Junction Temperature Estimation of Multichip Power Module Used in a Motor Drive –</i> Ouhab et al. (2018)[7]	Penelitian mengembangkan model elektrotermal untuk mengestimasi <i>junction temperature</i> power module pada motor drive. Penelitian menunjukkan bahwa temperatur <i>junction</i> memerlukan metode pengukuran atau estimasi khusus dan berbeda dengan temperatur pada titik eksternal komponen.	Penelitian ini tidak mengestimasi <i>junction temperature</i> , melainkan menggunakan satu DS18B20 untuk mengukur temperatur pada titik termal driver. Nilai tersebut digunakan sebagai umpan balik sistem pendinginan.
4	<i>Implementation of Fuzzy Control in a Domestic Refrigerator Considering the Influence of the Thermal Load –</i> Rodríguez-Valderrama et al. (2023)[8]	Penelitian menerapkan fuzzy logic pada sistem refrigerasi dengan menjadikan kondisi temperatur dan <i>thermal load</i> sebagai variabel dalam pengendalian. Fuzzy controller digunakan untuk mengatur kecepatan fan evaporator dan aliran udara berdasarkan aturan fuzzy.	Konsep pengaturan fan berbasis fuzzy diterapkan pada sistem pendinginan driver motor kendaraan listrik. Masukan fuzzy berupa temperatur driver dan kecepatan kendaraan, sedangkan keluarannya berupa nilai PWM yang mengatur kecepatan dua fan pendingin.

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan implementasi sistem monitoring serta pendinginan aktif pada driver motor kendaraan listrik roda dua berbasis motor BLDC 800 W. Kendaraan menggunakan baterai LiFePO₄ 52 V dengan kapasitas 12Ah sebagai sumber energi

utama untuk menyuplai motor dan sistem penggerakannya. Informasi kecepatan kendaraan diperoleh dari sensor *Hall effect* pada motor BLDC yang digunakan untuk mendeteksi putaran rotor dan selanjutnya diolah menjadi nilai kecepatan kendaraan. Selain parameter kecepatan, kondisi termal driver motor juga dipantau menggunakan sensor suhu digital DS18B20 yang ditempatkan pada titik termal driver/controller. Temperatur yang diperoleh dari sensor tersebut merupakan temperatur pada titik pengukuran eksternal driver dan tidak dinyatakan sebagai *junction temperature* MOSFET.

Sistem monitoring menggunakan mikrokontroler Arduino Nano berbasis ATmega328P sebagai pusat pengolahan data. Parameter temperatur driver dan kecepatan kendaraan digunakan sebagai dua masukan pada metode *fuzzy logic* Mamdani. Kedua parameter tersebut diproses menggunakan fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy untuk menentukan kondisi operasional sistem ke dalam tiga kategori, yaitu *ideal*, *caution*, dan *danger*. Penggunaan dua parameter tersebut memungkinkan sistem mempertimbangkan kondisi termal driver sekaligus kondisi operasi kendaraan dalam menentukan kebutuhan pendinginan. Berbeda dengan sistem *active thermal control* yang melakukan intervensi secara langsung terhadap proses *switching*, arus, atau keluaran inverter, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini tidak melakukan pengendalian terhadap komutasi maupun daya utama motor BLDC. Pengendalian dilakukan pada sistem pendinginan eksternal sehingga tidak mengubah prinsip kerja utama motor dan controller.

Hasil pengolahan *fuzzy logic* digunakan untuk memberikan informasi kondisi sistem secara *real-time* melalui LCD 20×4 berbasis *I2C* serta menentukan besarnya sinyal PWM untuk mengatur kecepatan dua buah *DC brushless fan* 12 V 0,3 A. Kedua fan digunakan sebagai sumber *forced-air cooling* dengan aliran udara diarahkan menuju area driver/controller motor sehingga pelepasan panas dari perangkat elektronika daya dapat ditingkatkan. Pengaturan kecepatan fan dilakukan menggunakan driver L298N berdasarkan nilai keluaran sistem fuzzy, sehingga intensitas pendinginan dapat disesuaikan dengan kondisi temperatur driver dan kecepatan kendaraan. Pada kondisi operasi normal, fan dapat bekerja dengan intensitas yang lebih rendah, sedangkan peningkatan temperatur dan perubahan

kondisi operasi kendaraan akan menghasilkan peningkatan nilai PWM sehingga aliran udara pendingin menuju driver menjadi lebih besar.

Pengembangan sistem tersebut menggabungkan beberapa konsep dari penelitian terdahulu, yaitu kebutuhan *thermal management* pada perangkat elektronika daya, penerapan *forced-air cooling*, pemantauan temperatur pada sistem motor drive, serta pengaturan kecepatan fan menggunakan *fuzzy logic*. Penelitian ini tidak melakukan estimasi *junction temperature* MOSFET sebagaimana dilakukan pada beberapa penelitian terdahulu, tetapi menggunakan temperatur yang terukur secara langsung pada titik termal driver sebagai parameter kondisi termal sistem. Dengan pendekatan tersebut, sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi untuk melakukan monitoring kondisi operasional kendaraan, tetapi juga memberikan tindakan preventif berupa pengaturan pendinginan secara adaptif untuk membantu menekan peningkatan temperatur driver selama kendaraan beroperasi.

2.2 Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik (*electric vehicle/EV*) merupakan sistem transportasi yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utama untuk menggerakkan motor listrik. Berbeda dengan kendaraan berbahan bakar fosil yang bergantung pada proses pembakaran internal, kendaraan listrik mengonversi energi listrik menjadi energi mekanik melalui motor listrik dengan efisiensi yang lebih tinggi serta emisi gas buang yang lebih rendah [9]. Penggunaan kendaraan listrik terus meningkat seiring dengan kebutuhan akan sistem transportasi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.



Gambar 2.1 Motor Listrik [10]

Dapat diamati pada gambar 2.1, secara umum sistem kendaraan listrik terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu baterai sebagai sumber energi, motor listrik (umumnya tipe *BLDC* atau *Permanent Magnet Synchronous Motor/PMSM*), kontroler motor, sistem manajemen daya, serta sistem pendukung seperti *battery management system* dan sistem pendingin. Struktur sistem daya kendaraan listrik secara komprehensif dijelaskan oleh Ehsani dkk. dalam bukunya *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* yang menyatakan bahwa arsitektur EV mencakup integrasi sumber energi, konverter daya, sistem kontrol, dan aktuator mekanik dalam satu kesatuan sistem terintegrasi [11].

keandalan (*reliability*) sistem kendaraan listrik sangat bergantung pada integrasi sistem energi dan kontrol yang baik [12]. Dalam konteks penelitian ini, keandalan tersebut berkaitan langsung dengan kestabilan suhu baterai dan kontroler selama kendaraan beroperasi.

Selain aspek efisiensi, faktor keselamatan (*safety*) juga menjadi perhatian utama dalam pengembangan kendaraan listrik. Manajemen termal dan pemantauan temperatur merupakan elemen penting dalam sistem kendaraan listrik modern [13]. Dalam penelitian ini, objek termal yang dimonitor adalah driver motor BLDC, bukan baterai. Baterai hanya digunakan sebagai sumber energi utama kendaraan dan sumber energi sistem monitoring serta pendinginan. Temperatur baterai tidak diukur sehingga kondisi termal baterai tidak digunakan sebagai masukan sistem fuzzy.

Sistem monitoring suhu bukan sekadar fitur tambahan, melainkan bagian penting dalam menjaga performa [14]. Pada kondisi operasional, peningkatan kecepatan kendaraan menyebabkan peningkatan arus pada motor BLDC dan kontroler. Arus yang lebih besar menghasilkan rugi-rugi konduksi dan switching pada MOSFET kontroler, yang berkontribusi terhadap kenaikan suhu dalam ruang tertutup (*enclosure*) baterai dan kontroler[15]. Tanpa sistem monitoring yang memadai, pengguna tidak dapat mengetahui apakah sistem berada dalam kondisi aman (*ideal*), waspada (*caution*), atau berbahaya (*danger*).

Oleh karena itu, integrasi sistem monitoring suhu dan kecepatan dalam kendaraan listrik menjadi pendekatan yang relevan untuk meningkatkan keselamatan operasional. Sistem ini tidak bertujuan mengendalikan kecepatan

motor, melainkan mengklasifikasikan kondisi operasi berdasarkan parameter suhu dan beban (direpresentasikan oleh kecepatan motor). Pendekatan ini mendukung konsep *lightweight intelligent monitoring system* berbasis *embedded microcontroller* yang sesuai untuk kendaraan listrik ringan.

Dengan demikian, pengembangan sistem monitoring suhu berbasis sensor digital dan metode *fuzzy logic* pada kendaraan listrik merupakan bagian dari upaya peningkatan keandalan dan keselamatan sistem daya kendaraan listrik, khususnya pada skala kendaraan roda dua berbasis motor BLDC dan baterai LiFePO₄.

2.3 Motor BLDC pada Kendaraan Listrik

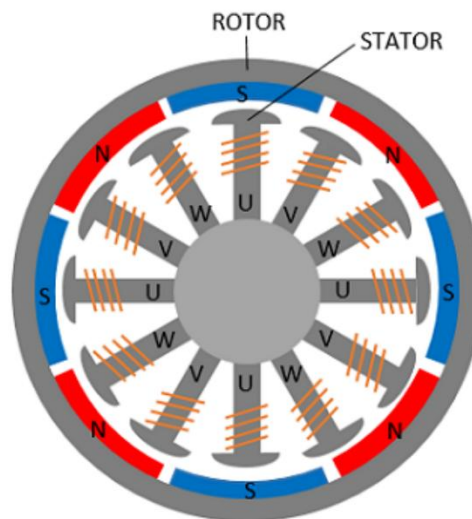
Motor *BLDC* merupakan motor listrik arus searah yang tidak menggunakan sikat (*brush*) maupun komutator mekanik dalam proses komutasinya. Berbeda dengan motor DC konvensional, proses pergantian arus pada motor BLDC dilakukan secara elektronik menggunakan rangkaian kontroler dan sensor posisi rotor. Motor ini bekerja berdasarkan prinsip interaksi medan magnet antara stator dan rotor, di mana gaya tarik antara kutub berbeda dan gaya tolak antara kutub sejenis menghasilkan momen putar (*torque*)[16]. Secara prinsip, ketika arus listrik dialirkan ke lilitan stator dengan urutan tertentu, akan terbentuk medan magnet yang berubah-ubah secara terkontrol. Medan magnet tersebut berinteraksi dengan magnet permanen yang terpasang pada rotor sehingga menghasilkan gerakan rotasi.

Motor BLDC memiliki tingkat keandalan (*reliability*) yang tinggi, sehingga sangat sesuai digunakan pada kendaraan listrik roda dua yang membutuhkan sistem penggerak efisien dan minim perawatan [17]. Pada motor BLDC yang digunakan pada kendaraan listrik, rotor umumnya terdiri dari magnet permanen, sedangkan stator berisi lilitan tiga fasa. Komutasi elektronik dilakukan berdasarkan informasi posisi rotor yang diperoleh dari sensor Hall yang terpasang di dalam motor.



Gambar 2.2 Motor BLDC[18]

Dapat dilihat pada Gambar 2.2 bahwa rotor, stator, dan Hall sensor telah terintegrasi dalam satu kesatuan konstruksi motor BLDC dan disegel rapat untuk melindungi komponen internal dari debu maupun kontaminasi luar. Konstruksi motor BLDC secara umum terdiri atas stator dengan kumparan tiga fasa dan rotor dengan magnet permanen yang dipasang secara berselang-seling antara kutub utara dan selatan. Susunan magnet tersebut dirancang untuk menghasilkan distribusi fluks magnet yang optimal sehingga mampu menghasilkan torsi yang stabil.



Gambar 2.3 Konstruksi BLDC [19]

Konstruksi dari motor BLDC dapat dilihat pada Gambar 2.3 yang memperlihatkan stator berisi kumparan dan rotor yang dipenuhi magnet permanen. Setiap fasa stator ditempatkan dengan sudut listrik tertentu sehingga menghasilkan beda potensial magnetik yang memicu rotasi rotor.

Tabel 2.3 Spesifikasi BLDC [20]

Spesifikasi	BLDC Bosch	Satuan
Daya maksimal	800	Watt
Tegangan Sumber	48 – 64	V
Arus Maksimal	20	A
Kecepatan Putar Maksimal	1000	RPM
Ukuran Roda	10	Inchi
Kecepatan Nominal	40	Km/h
Beban Maksimal	180	Kg
Torsi maksimum	80	Nm
Tipe Sensor Rotor	<i>Hall</i>	-
Efisiensi Daya	82	%
Suhu Operasi	-20 - 45	°C

Dapat dilihat dari tabel 2.3 motor BLDC yang dipakai memiliki torsi dan kecepatan yang cukup tinggi untuk mendayai sebuah sepeda Listrik. BLDC umumnya menggunakan tiga kabel fasa sebagai jalur suplai arus hasil switching kontroler, yaitu fasa U, V, dan W. Selain itu, terdapat lima kabel tambahan untuk sensor Hall, yang terdiri atas dua kabel catu daya dan tiga kabel sinyal posisi. Sensor Hall berfungsi mendeteksi kecepatan motor.

Dalam penelitian ini, motor BLDC tidak menjadi objek pengendalian kecepatan, melainkan sebagai sumber beban termal sistem. Ketika kendaraan beroperasi pada kecepatan tinggi atau membawa beban besar, arus yang mengalir melalui lilitan stator meningkat sehingga menyebabkan rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dan rugi-rugi switching pada kontroler. Peningkatan rugi-rugi daya tersebut menghasilkan panas yang dapat memengaruhi suhu di dalam *enclosure* baterai dan kontroler. Parameter beban operasional yang dalam penelitian ini direpresentasikan oleh kecepatan kendaraan (berdasarkan sinyal Hall sensor), memiliki keterkaitan langsung terhadap kondisi termal system [21]. Oleh karena itu, integrasi pembacaan kecepatan motor dengan pemantauan suhu menjadi relevan dalam sistem klasifikasi keamanan berkendara berbasis *fuzzy logic*.

Dengan karakteristik efisiensi tinggi, konstruksi sederhana, dan dukungan komutasi elektronik berbasis sensor Hall, motor BLDC menjadi pilihan utama pada kendaraan listrik roda dua. Namun demikian, peningkatan suhu akibat beban operasional tetap menjadi faktor yang perlu dimonitor untuk menjaga keselamatan dan keandalan sistem kendaraan listrik secara keseluruhan.

2.4 Logika Fuzzy

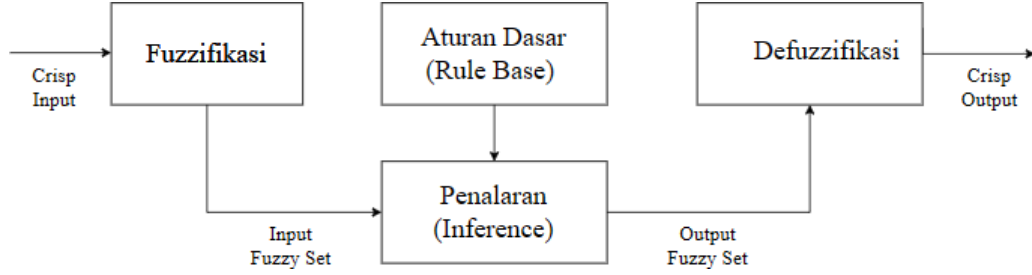
Teori logika fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 melalui makalah berjudul *Fuzzy Set*. Sejak saat itu, logika fuzzy berkembang pesat dan mulai diaplikasikan pada berbagai permasalahan teknik, terutama pada sistem yang memiliki ketidakpastian dan karakteristik nonlinier. Logika fuzzy merupakan pengembangan dari logika klasik (*boolean logic*) yang hanya mengenal dua kondisi yaitu benar (1) dan salah (0) [22].

Dalam logika klasik, suatu kondisi hanya dapat dinyatakan dalam bentuk biner seperti “ya atau tidak”, “benar atau salah”, serta “baik atau buruk”. Namun, pada logika fuzzy, suatu variabel dapat memiliki nilai keanggotaan pada rentang antara 0 hingga 1. Hal ini memungkinkan suatu kondisi memiliki lebih dari satu nilai kebenaran secara bersamaan dengan tingkat keanggotaan tertentu [23]. Dengan demikian, logika fuzzy lebih mampu merepresentasikan kondisi nyata yang bersifat tidak pasti dan gradual. Secara umum, logika fuzzy memiliki beberapa komponen utama, yaitu:

- a. Himpunan tegas (*crisp set*), yaitu nilai input yang bersifat pasti dan menjadi dasar dalam proses pengolahan data.
- b. Himpunan fuzzy (*fuzzy set*), yaitu pengelompokan nilai input ke dalam kategori linguistik seperti *ideal*, *caution*, dan *danger*.
- c. Fungsi keanggotaan (*membership function*), yang menyatakan derajat keanggotaan suatu nilai dalam rentang 0 hingga 1.
- d. Variabel linguistik, yaitu representasi nilai dalam bentuk bahasa yang digunakan dalam sistem fuzzy.
- e. Basis aturan (*rule base*), yaitu kumpulan aturan berbentuk *IF-THEN* yang digunakan untuk menentukan hubungan antara input dan output sistem.

Ketika menggunakan logika Fuzzy, ada beberapa pendekatan untuk mengubah *Input* menjadi *Output* melalui sistem inferensi Fuzzy. Proses ini

mencakup operasi logika, fungsi keanggotaan, dan aturan *if-then*. Gambar 2.4 menunjukkan diagram blok pengendali logika. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4, sistem logika *Fuzzy* terdiri dari beberapa tahap, termasuk :



Gambar 2.4 Diagram Umum Fuzzy Logic

2.4.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai masukan tegas (*crisp input*) menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Pada tahap ini, setiap variabel input dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan tertentu seperti fungsi segitiga (*triangular*) dan trapesium (*trapezoidal*) [22].

Pada penelitian ini, proses fuzzifikasi dilakukan terhadap dua variabel input yaitu suhu sistem dan kecepatan kendaraan, yang masing-masing diklasifikasikan ke dalam kategori linguistik *ideal*, *caution*, dan *danger*.

a. Fungsi Keanggotaan Segitiga (Triangular)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (2.1)$$

b. Fungsi Keanggotaan Trapesium (Trapezoidal)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (2.2)$$

Fungsi keanggotaan berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.2 digunakan untuk merepresentasikan kondisi yang memiliki nilai stabil pada rentang tertentu, seperti kondisi *ideal* dan *danger* pada variabel suhu dan kecepatan.

2.4.2 Aturan Dasar (*Rule Base*)

Basis aturan merupakan kumpulan aturan berbentuk *IF-THEN* yang menghubungkan variabel input dengan variabel output. Aturan ini disusun berdasarkan karakteristik sistem kendaraan listrik, khususnya hubungan antara suhu, kecepatan, dan kebutuhan pendinginan.

Contoh aturan pada sistem ini:

- IF suhu *ideal* AND kecepatan *ideal* THEN *fan low*
- IF suhu *caution* AND kecepatan *caution* THEN *fan medium*
- IF suhu *danger* AND kecepatan *danger* THEN *fan high*

Aturan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dan kecepatan kendaraan, maka sistem akan meningkatkan kecepatan kipas pendingin untuk menjaga kestabilan suhu.

2.4.3 Penalaran (*Inference*)

Tahap inferensi bertujuan untuk mengevaluasi setiap aturan fuzzy berdasarkan derajat keanggotaan input. Pada metode Mamdani, digunakan operator logika MIN untuk operasi AND dan MAX untuk agregasi hasil aturan.

Operator AND (Minimum)

$$\alpha_i = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.3)$$

Operator OR (Maximum)

$$\alpha_i = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.4)$$

Implikasi Mamdani

$$\mu_{output}(z) = \min(\alpha_i, \mu_C(z)) \quad (2.5)$$

Agregasi Aturan

$$\mu_{agregasi}(z) = \max(\mu_1(z), \mu_2(z), \dots, \mu_n(z)) \quad (2.6)$$

2.4.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses mengubah keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat digunakan sebagai sinyal kendali. Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode centroid (*center of gravity*) [24].

Bentuk Kontinu

$$z^* = \frac{\int z\mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (2.7)$$

Bentuk Diskrit (Implementasi Arduino)

$$z^* = \frac{\sum z_i \cdot \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)} \quad (2.8)$$

Nilai z^* pada penelitian ini merupakan output berupa nilai PWM (0–255) yang digunakan untuk mengatur kecepatan kipas pendingin melalui driver motor L298N. Nilai PWM yang dihasilkan akan menyesuaikan kondisi suhu dan kecepatan kendaraan secara adaptif.

Pada sistem kendali fuzzy, variabel masukan dan keluaran dapat memiliki himpunan linguistik yang berbeda. Pada penelitian ini, variabel masukan temperatur dan kecepatan masing-masing terdiri atas himpunan Ideal, Caution, dan Danger, sedangkan variabel keluaran PWM terdiri atas himpunan Low, Medium, dan Fast. Setelah proses inferensi dan agregasi, metode centroid digunakan untuk menghasilkan nilai crisp PWM pada rentang 0–255. Nilai crisp tersebut selanjutnya digunakan sebagai sinyal kendali tingkat pengoperasian kipas.

2.5 Kontroler Motor BLDC

Kontroler motor BLDC merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi untuk mengatur proses komutasi elektronik dengan mengendalikan arus yang dialirkan ke lilitan stator. Berbeda dengan motor DC konvensional yang menggunakan komutator mekanik, motor BLDC memerlukan rangkaian inverter berbasis transistor daya (umumnya MOSFET) untuk menghasilkan arus tiga fasa secara bergantian. Proses pengaturan arus ini menentukan arah putaran, kecepatan, serta karakteristik torsi motor.

Pada penggerak BLDC, kontroler kendaraan melakukan komutasi elektronika untuk membentuk urutan penguatan kumparan. Rangkaian daya tersebut memiliki rugi listrik yang menimbulkan panas selama pengoperasian. Besarnya panas dipengaruhi kondisi pembebanan serta karakteristik komponen. Pada kendaraan listrik ringan, metode komutasi yang banyak digunakan adalah metode *six-step commutation* atau dikenal juga sebagai *trapezoidal commutation*. Metode ini mengaktifkan dua dari tiga fasa secara bersamaan dalam enam langkah berbeda

untuk satu siklus listrik penuh. Setiap langkah berlangsung selama 60° sudut listrik, sehingga dalam satu putaran penuh terjadi enam kali perubahan kombinasi saklar aktif [25]. Wujud klontroler/driver motor dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Driver/Kontroler Motor BLDC

Dalam sistem *six-step*, kombinasi saklar yang aktif ditentukan berdasarkan sinyal logika dari tiga sensor Hall yang terpasang pada motor. Setiap perubahan posisi rotor akan memicu perubahan pola aktivasi MOSFET pada kontroler, sehingga menghasilkan medan magnet stator yang berpindah secara diskrit. Pola ini menghasilkan gelombang arus berbentuk trapezoidal yang sesuai dengan karakteristik motor BLDC.

Meskipun metode ini sederhana dan efisien untuk aplikasi kendaraan ringan, proses switching MOSFET secara berulang menyebabkan timbulnya rugi-rugi daya (*power losses*). Rugi-rugi daya ini menghasilkan panas pada modul kontroler. Jika kontroler ditempatkan dalam ruang tertutup bersama baterai, maka akumulasi panas dapat meningkatkan temperatur internal sistem.

Sistem inverter pada kendaraan listrik merupakan salah satu kontributor utama panas pada *powertrain EV*. Hal ini menegaskan bahwa kontroler motor BLDC bukan hanya berfungsi sebagai pengatur arus, tetapi juga merupakan sumber panas yang signifikan dalam sistem kendaraan listrik. Oleh karena itu, pemantauan suhu pada sistem yang menempatkan baterai dan kontroler dalam satu *enclosure* menjadi penting untuk mencegah kondisi *overheating*.

Dalam konteks penelitian ini, kontroler motor BLDC menggunakan metode *six-step commutation* berbasis sensor Hall. Peningkatan kecepatan umumnya berkorelasi dengan peningkatan arus dan rugi daya, sehingga dapat memengaruhi suhu di dalam kotak baterai dan kontroler. Dengan demikian, pemahaman terhadap karakteristik kerja kontroler BLDC dan sumber panas yang dihasilkannya menjadi dasar penting dalam perancangan sistem monitoring suhu dan klasifikasi kondisi operasi kendaraan listrik berbasis *fuzzy logic*.

2.6 Baterai LiFePO_4

Baterai merupakan komponen utama dalam sistem kendaraan listrik karena berfungsi sebagai sumber energi untuk menyuplai daya ke motor melalui kontroler. Pada penelitian ini digunakan baterai tipe Lithium Iron Phosphate (*Lithium Iron Phosphate/LiFePO₄*) dengan spesifikasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.4. Pemilihan baterai LiFePO_4 didasarkan pada karakteristik stabilitas termal yang baik, umur siklus panjang, serta tingkat keamanan yang lebih tinggi dibandingkan baterai lithium-ion berbasis *cobalt*.



Gambar 2.6 Baterai LiFePO_4 [26]

Manajemen termal pada baterai lithium-ion merupakan aspek kritis dalam menjaga performa dan keselamatan sistem. Temperatur operasi memiliki pengaruh langsung terhadap umur pakai (*cycle life*) dan keamanan baterai [27]. Hal ini relevan dengan penelitian ini yang berfokus pada monitoring suhu sebagai indikator kondisi operasional kendaraan listrik.

Tabel 2.4 Spesifikasi Baterai LiFePO₄ 52V 12Ah [26]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan	52	V
Kapasitas	12	Ah
Daya Simpan	576	Wh
Tegangan cut-off	36,8	V
Siklus pengecasan	3000	-
Arus Output Maksimal	12	A
Suhu Pengecasan	0 - 45	°C
Suhu Operasi	-20 - 60	°C

Berdasarkan spesifikasi tersebut, baterai memiliki tegangan nominal 52 V dengan kapasitas 12 Ah dan energi tersimpan sebesar 576 Wh. Tegangan *cut-off* sebesar 36,8 V menunjukkan batas minimum tegangan operasi sebelum baterai harus dihentikan penggunaannya untuk mencegah kerusakan sel. Rentang suhu operasi baterai berada pada -20°C hingga 60°C, sedangkan suhu pengecasan direkomendasikan pada rentang 0°C hingga 45°C.

Performa baterai lithium-ion sangat dipengaruhi oleh kondisi temperatur lingkungan dan temperatur internal sel. Artinya, temperatur yang terlalu tinggi dapat mempercepat proses degradasi kimia di dalam sel baterai dan menurunkan kapasitas efektifnya [11]. Oleh karena itu, meskipun batas suhu operasi maksimum mencapai 60°C, kondisi ideal untuk menjaga umur pakai baterai berada pada rentang yang lebih rendah, umumnya sekitar 20–40°C [28].

Selain degradasi kapasitas, peningkatan suhu juga berpotensi menyebabkan ketidakstabilan termal. Meskipun LiFePO₄ dikenal memiliki stabilitas termal lebih baik dibandingkan jenis lithium-ion lainnya, kondisi *overheating* tetap harus dihindari. LiFePO₄ memiliki struktur kimia yang lebih stabil karena ikatan fosfat (PO₄³⁻) yang kuat, sehingga lebih tahan terhadap reaksi eksotermis berantai. Namun demikian, akumulasi panas akibat arus tinggi dan ventilasi yang kurang baik dalam *enclosure* tetap dapat meningkatkan risiko kegagalan sistem.

Dalam sistem kendaraan listrik roda dua, baterai sering ditempatkan dalam satu kotak bersama kontroler motor. Oleh karena itu, pemantauan suhu dalam kotak

baterai dan kontroler menjadi penting untuk menjaga sistem tetap berada dalam batas aman. Dalam penelitian ini, suhu dimonitor sebagai parameter operasional yang mewakili kondisi termal sistem secara keseluruhan. Monitoring suhu secara *real-time* menjadi langkah preventif untuk menjaga umur pakai baterai serta meningkatkan keselamatan pengguna kendaraan listrik.

2.7 Sensor Suhu DS18B20

Parameter suhu menjadi variabel utama dalam sistem klasifikasi keamanan berkendara karena berkaitan langsung dengan performa, umur pakai, dan keselamatan baterai sebagaimana telah dibahas pada subbab sebelumnya. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor digital tipe DS18B20. Sensor ini dipilih karena memiliki akurasi yang baik, komunikasi digital yang stabil, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler berbasis ATmega328P seperti Arduino Nano.

Sistem monitoring suhu berbasis mikrokontroler mampu menampilkan data suhu secara *real-time* dan memberikan informasi kondisi sistem secara akurat untuk mendukung proteksi baterai [29]. Meskipun penelitian tersebut difokuskan pada sistem pengisian baterai, konsep monitoring suhu secara *real-time* tetap relevan dalam penelitian ini, khususnya untuk mendeteksi kenaikan suhu akibat beban operasional kendaraan.



Gambar 2.7 Sensor Suhu DS18B20[30]

DS18B20 merupakan sensor suhu digital dengan protokol komunikasi *1-Wire* yang memungkinkan beberapa sensor dihubungkan pada satu jalur data. Dapat dilihat pada gambar 2.7 Sistem komunikasi ini hanya membutuhkan satu pin data

selain catu daya dan ground, sehingga sangat efisien untuk sistem embedded dengan keterbatasan pin.

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor DS18B20[31]

Parameter	Nilai	Satuan
Rentang Pengukuran	-55 – 125	°C
Akurasi (−10°C s.d 85°C)	±0,5	°C
Resolusi	9 – 12	bit
Tegangan Operasi	3,0 – 5,5	V
Protokol Komunikasi	1-Wire	-
Waktu Konversi Maksimum	750	ms

Dalam tabel 2.5 Yan didapat dari datasheet resmi Maxim Integrated, disebutkan bahwa sensor memiliki resolusi hingga 12-bit dengan akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang -10°C hingga 85°C . Rentang ini sudah mencakup batas suhu operasi baterai LiFePO₄ (-20°C hingga 60°C), sehingga sensor sesuai digunakan untuk sistem monitoring kendaraan listrik.

Selain itu, penggunaan sensor digital lebih tahan terhadap gangguan noise dibandingkan sensor analog seperti termistor, terutama dalam lingkungan kendaraan listrik yang memiliki switching MOSFET dan arus tinggi pada kontroler motor. Hal ini penting karena interferensi elektromagnetik dapat memengaruhi kestabilan pembacaan sensor.

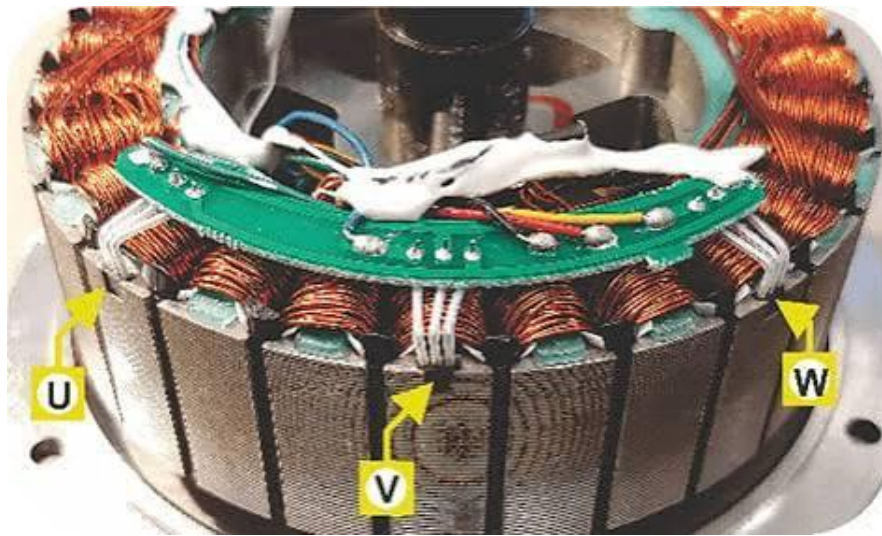
Pada penelitian ini, sensor DS18B20 ditempatkan di dalam box yang sama dengan baterai dan kontroler motor. Karena kedua komponen berada dalam satu ruang tertutup, sensor digunakan untuk merepresentasikan kondisi suhu lingkungan internal sistem secara keseluruhan.

2.8 Hall Effect Sensor

Pada penelitian ini, kecepatan kendaraan diperoleh dari pembacaan sinyal *Hall Effect sensor* yang terdapat pada motor BLDC. Data kecepatan tersebut kemudian digunakan sebagai salah satu variabel input pada sistem *fuzzy logic* untuk mengklasifikasikan kondisi operasi kendaraan Listrik.

Fenomena *Hall Effect* merupakan prinsip dasar yang digunakan dalam sensor Hall untuk mendeteksi medan magnet. Untuk memberikan sinyal yang presisi saat

mendeteksi perubahan medan magnet, sensor *hall effect* umumnya menggunakan bahan semi konduktor, yang lebih sensitif daripada logam biasa [32].



Gambar 2.8 *Hall Sensor BLDC*

Gambar 2.8 merupakan sensor *Hall Effect* berperan penting dalam penelitian ini sebagai sensor kecepatan. Sensor Hall pada motor BLDC memiliki dua fungsi utama, yaitu mendeteksi posisi rotor untuk proses komutasi elektronik dan memberikan informasi kecepatan rotasi motor. Pada penelitian ini, salah satu sinyal Hall sensor dari motor BLDC dimanfaatkan sebagai sumber data untuk pengukuran kecepatan kendaraan. Penggunaan satu sinyal Hall sensor sudah cukup untuk menghitung kecepatan rotasi motor karena setiap putaran rotor akan menghasilkan sejumlah pulsa yang dihitung oleh mikrokontroler.

Tabel 2.6 Spesifikasi *Hall Effect* Sensor SS41[33]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sumber	4,5 – 24	V
Jumlah Pin	3	-
Suplai Arus	50	mA
Tegangan saturasi	0.5	V
Output rise time	1.5	μ s
Output fall time	1.5	μ s
Suhu Operasi	-40 – 125	$^{\circ}$ C
Tegangan keluaran	4,5 – 24	V

Berdasarkan tabel 2.6 sensor hall effect mampu bekerja secara non kontak sehingga lebih awet, tahan terhadap debu, dan dapat bekerja pada lingkungan dengan getaran tinggi. Memiliki tegangan kerja di rentang 4,5 -24 VDC

Pulsa yang dihasilkan oleh sensor Hall dibaca oleh Arduino Nano melalui pin digital. Setiap kali magnet rotor melewati sensor, sensor akan menghasilkan satu pulsa logika digital. Jumlah pulsa yang terdeteksi dalam interval waktu tertentu kemudian digunakan untuk menghitung kecepatan putaran motor dalam satuan *Revolutions Per Minute* (RPM).

Perhitungan RPM dilakukan dengan menghitung jumlah pulsa yang terdeteksi selama satu detik, kemudian dikonversikan menjadi jumlah putaran per menit menggunakan persamaan berikut:

$$n = \frac{N \times 60}{p\Delta t} \quad (2.9)$$

dengan:

n = putaran roda (RPM);

N = jumlah pulsa;

p = jumlah pulsa per putaran mekanik;

Δt = interval pengukuran (s).

Setelah nilai RPM diperoleh, selanjutnya mengonversi nilai tersebut menjadi kecepatan linear kendaraan. Kecepatan kendaraan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (2.10)$$

dalam m/s.

Konversi ke km/jam:

$$v = \frac{\pi D n \times 60}{1000} \quad (2.11)$$

Untuk mengevaluasi kesesuaian hasil pembacaan kecepatan sistem terhadap alat ukur pembanding, digunakan perhitungan selisih absolut dan persentase selisih. Selisih absolut digunakan untuk mengetahui besar perbedaan nilai antara hasil pembacaan sistem dan nilai referensi, sedangkan persentase selisih digunakan untuk menunjukkan besar perbedaan tersebut terhadap nilai referensi dalam bentuk persen. Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan berikut:

Selisih absolut:

$$e = |x_{ukur} - x_{ref}| \quad (2.12)$$

Persentase selisih:

$$e(\%) = \frac{|x_{ukur} - x_{ref}|}{x_{ref}} \quad (2.13)$$

dengan:

e = selisih absolut hasil pengukuran;

$e\%$ = pesentase selisih (%);

x_{ukur} = nilai yang dihasilkan sistem atau alat yang diuji;

x_{ref} = nilai dari alat atau nilai referensi.

2.9 DC Brushless Fan 12V 0.3A

DC brushless fan merupakan jenis kipas yang menggunakan motor DC tanpa sikat (*brushless motor*) untuk menghasilkan aliran udara. Kipas ini banyak digunakan pada sistem pendingin perangkat elektronik seperti komputer, inverter, serta sistem kendaraan listrik karena memiliki efisiensi tinggi, umur pakai yang panjang, dan tingkat kebisingan yang relatif rendah.



Gambar 2.9 Brushless DC Fan[34]

Gambar 2.9 merupakan *DC Brushless Fan* yang bekerja dengan menggunakan rangkaian elektronik internal untuk menggerakkan rotor yang dilengkapi magnet permanen. Ketika tegangan diberikan pada kipas, rangkaian internal akan menghasilkan medan magnet yang menyebabkan rotor berputar sehingga menghasilkan aliran udara.

Tabel 2.7 Spesifikasi Brushless DC Fan[35]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Operasi	12	V
Arus Operasi	0.3	A
Daya	3	W
Tipe Motor	Brushless DC	
Tipe Bearing	Sleeve / Ball Bearing	-

Berdasarkan Tabel 2.7 *DC brushless fan* memiliki tegangan kerja 12 V dan arus sekitar 0.3 A. Kipas ini dipilih karena memiliki ukuran yang relatif kecil namun mampu menghasilkan aliran udara yang cukup untuk mendinginkan ruang *enclosure* baterai dan kontroler.

Pada penelitian ini, kecepatan putaran kipas tidak diatur secara konstan, melainkan dikendalikan secara dinamis menggunakan metode PWM. Teknik PWM memungkinkan mikrokontroler mengatur tegangan rata-rata yang diberikan ke motor kipas dengan cara mengubah nilai *duty cycle* dari sinyal digital.

Sinyal PWM merupakan sinyal digital yang memiliki periode tetap dengan variasi lebar pulsa. Perbandingan antara waktu sinyal berada pada kondisi *high* terhadap satu periode penuh disebut sebagai *duty cycle*. Hubungan antara nilai PWM dan *duty cycle* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Duty Cycle = \frac{PWM}{255} \times 100\% \quad (2.14)$$

dimana nilai PWM berada pada rentang 0 hingga 255. Semakin besar nilai PWM yang dihasilkan, maka semakin besar *duty cycle* sehingga tegangan rata-rata yang diterima motor kipas meningkat dan menyebabkan kecepatan kipas bertambah.

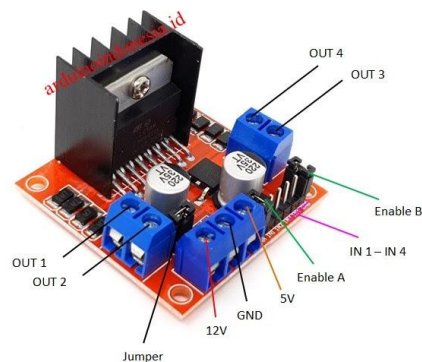
Sebaliknya, untuk menentukan nilai PWM dari *duty cycle*, dapat digunakan persamaan:

$$PWM = \frac{Duty Cycle}{100} \times 255 \quad (2.15)$$

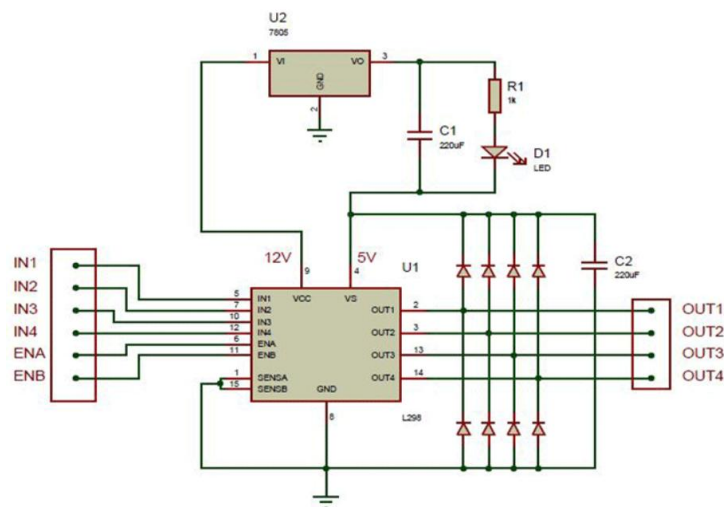
Dengan demikian, sistem logika fuzzy yang menghasilkan nilai PWM dapat secara langsung digunakan untuk mengatur kecepatan kipas pendingin secara proporsional terhadap kondisi suhu dan kecepatan kendaraan.

2.10 Driver Motor L298N

Driver motor merupakan rangkaian antarmuka yang berfungsi sebagai penguat arus antara mikrokontroler dan beban motor DC. Mikrokontroler seperti Arduino Nano tidak mampu memberikan arus besar secara langsung untuk menggerakkan motor atau kipas DC, sehingga diperlukan rangkaian driver yang mampu menangani arus lebih tinggi serta memisahkan sisi logika dan sisi daya. L298N merupakan IC driver dengan konfigurasi dual full H-bridge yang dapat digunakan sebagai antarmuka antara sinyal logika mikrokontroler dan beban yang membutuhkan arus lebih besar. Modul ini memiliki dua kanal keluaran yang dapat dikendalikan secara independen melalui input logika dan pin enable. Penggunaan driver daya diperlukan karena keluaran mikrokontroler memiliki keterbatasan kemampuan arus dan tidak digunakan untuk menyuplai beban daya secara langsung. Oleh karena itu, mikrokontroler berfungsi menghasilkan sinyal kontrol, sedangkan L298N menangani jalur daya menuju beban.



Gambar 2.10 Driver Motor L298N[36]



Gambar 2.11 Internal Circuit Diagram L298N Motor Driver[36]

Gambar 2.10 adalah L298N kompatibel dengan level logika Arduino Nano (5V), sehingga integrasi sistem menjadi lebih sederhana. Dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan 2.11 Pada konfigurasi full H-bridge, arah aliran arus pada beban dapat diubah melalui kombinasi logika masukan. Kemampuan tersebut memungkinkan perubahan polaritas keluaran pada beban DC yang mendukung pengendalian dua arah. Selain itu, pin enable pada masing-masing kanal dapat diberikan sinyal Pulse Width Modulation (PWM) sehingga tingkat daya yang diberikan ke beban dapat diatur berdasarkan duty cycle.

Tabel 2.8 Spesifikasi Motor Driver L298N[37]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Operasional Motor	5 – 35	VDC
Arus Maksimum (Per Channel)	2 (Puncak)	A
Arus Operasi	0 - 36	mA
Suhu Operasi	-25 – 130	°C
Daya Maksimum	20	W

Dapat dilihat pada table 2.8 terdapat spesifikasi L298N yang merupakan IC driver berbasis konfigurasi *dual full H-bridge* yang memungkinkan pengendalian dua beban DC secara independen. Meskipun L298N memiliki konfigurasi *dual H-bridge* yang mendukung pembalikan arah putaran motor, dalam penelitian ini fitur pembalik arah tidak digunakan karena kipas hanya beroperasi satu arah.

2.11 Step down LM2596

Merupakan modul regulator switching yang memiliki IC LM2596 yang bersifat monolitik yang memiliki fungsi untuk switching step-down *direct current* (DC) dengan current rating 3A. Modul ini beroperasi pada frekuensi switching 150 kHz, sehingga memungkinkan filter yang berukuran lebih kecil perlu regulator lagi sebagai pengatur frekuensi yang lebih rendah. Modul step down LM2596 memiliki 4 pin, 2 pin Input DC di sebelah kiri dan 2 pin Output DC di sebelah kanan[11].



Gambar 2.12 Step Down LM2596

LM2596 berguna untuk menurunkan sumber daya utama yaitu baterai 12 Volt menjadi lebih rendah, yaitu 5 - 3.3 Volt, hal ini dibutuhkan untuk sensor dan komponen yang membutuhkan tegangan yang sesuai spesifikasi [38]. Hubungan antara tegangan, arus, dan daya mengacu pada persamaan berikut, dimana:

$$P = V \times I \quad (2.16)$$

dengan:

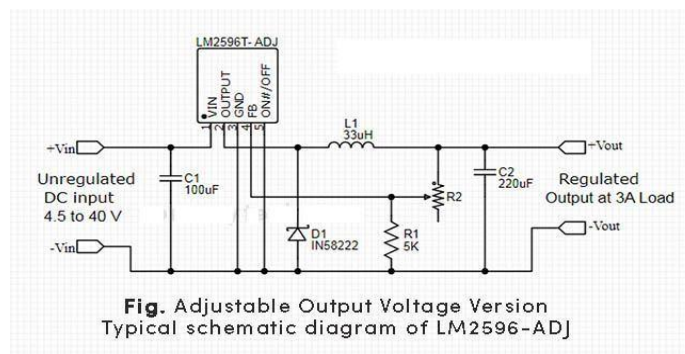
- P = daya listrik (W),
- V = tegangan kerja komponen (V),
- I = arus kerja komponen (A).

Untuk menentukan arus yang dibutuhkan dari baterai, digunakan hubungan antara daya, tegangan, dan arus, dimana:

$$I_{bat} = \frac{P}{V} \quad (2.17)$$

dengan:

- P = total daya sistem (W)
- V = tegangan baterai (V)



Gambar 2.13 Schematic Step Down LM2596[39]

Bisa dilihat pada gambar 2.12 Komponen utama yang ada pada modul ini berupa IC regulator LM2596 berfungsi menurunkan tegangan, induktor menyimpan energi dan melepaskan energi supaya stabil, dioda 1N5822 meningkatkan efisiensi regulator, kapasitor menjaga kestabilan tegangan dan heatsink untuk mendinginkan IC regulator.

Tabel 2.9 Spesifikasi *Step Down* LM2596

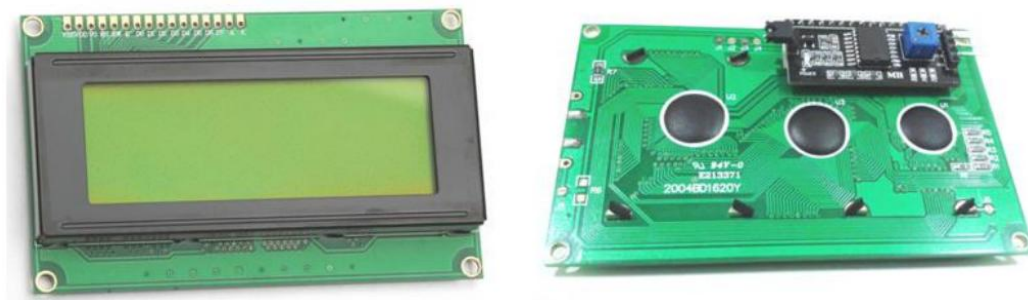
Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan <i>Input</i>	4 - 40	VDC
Tegangan <i>Output</i>	1.25 - 37	VDC
Arus	1 - 3	A
Frekuensi <i>Switching</i>	150	kHz
Operasi Temperatur	-45 - 85	°C
Efisiensi Step down	92	%

Dapat dilihat pada table 2.9, modul ini memiliki spesifikasi tegangan *Input* 4 – 40 VDC, tegangan *Output* 1.25 – 37 VDC, arus 1- 3 A, serta frekuensi *switching* 150kHz dan modul ini memiliki efisiensi mencapai 92% untuk mendapatkan tegangan yang sesuai kebutuhan.

2.12 LCD 20x4 I2C

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan salah satu perangkat tampilan yang banyak digunakan dalam sistem elektronik untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter maupun simbol. LCD bekerja dengan memanfaatkan sifat kristal cair yang dapat mengubah orientasi molekulnya ketika diberikan medan listrik sehingga dapat mengatur intensitas cahaya yang melewati layar[40].

Pada penelitian ini digunakan LCD 20x4 yang mampu menampilkan hingga 20 karakter pada setiap baris dan terdiri dari 4 baris tampilan. LCD ini digunakan untuk menampilkan informasi kondisi sistem monitoring kendaraan listrik secara *real-time*, seperti nilai suhu yang terbaca dari sensor, kecepatan kendaraan, serta hasil klasifikasi kondisi operasi yang dihasilkan oleh sistem *fuzzy logic* yaitu *ideal*, *caution*, dan *danger*.



Gambar 2.14 LCD I2C 20x4 [41]

Secara umum, LCD karakter dapat dihubungkan dengan mikrokontroler menggunakan dua metode komunikasi yaitu mode paralel dan mode serial. Pada mode paralel, LCD memerlukan banyak pin koneksi karena setiap bit data dikirim melalui jalur yang berbeda. Untuk mengatasi keterbatasan pin pada mikrokontroler, banyak modul LCD yang dilengkapi dengan modul I2C (Inter-Integrated Circuit).

Pada penelitian ini digunakan LCD 20x4 dengan modul I2C sehingga komunikasi antara LCD dan mikrokontroler Arduino Nano hanya memerlukan dua jalur komunikasi yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL). Metode komunikasi I2C memungkinkan beberapa perangkat dapat terhubung dalam satu jalur komunikasi yang sama sehingga lebih efisien dalam penggunaan pin mikrokontroler.

Komunikasi I2C merupakan protokol komunikasi serial yang banyak digunakan pada sistem embedded karena memiliki kecepatan komunikasi yang cukup baik serta memerlukan jumlah jalur yang relatif sedikit[42]. Dengan menggunakan komunikasi ini, mikrokontroler dapat mengirimkan data karakter ke modul LCD secara serial untuk kemudian ditampilkan pada layar.

Tabel 2.10 Spesifikasi LCD I2C 20x4

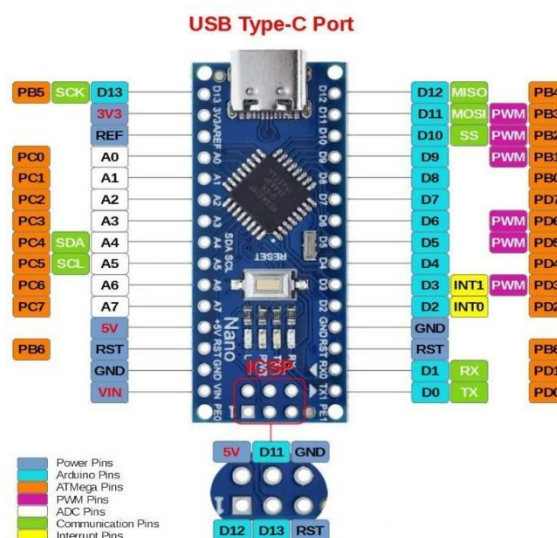
Parameter	Nilai	Satuan
Jumlah Baris	4	Baris
Jumlah Karakter per Baris	20	Karakter
Tegangan Operasi	5	V
Kontroler	HD44780	-
Interface Komunikasi	I2C	-
Pin Komunikasi	SDA, SCL	-

Berdasarkan Tabel 2.10, LCD yang digunakan merupakan tipe LCD karakter 20x4 yang mampu menampilkan hingga 20 karakter pada setiap baris dengan total 4 baris tampilan. Modul ini bekerja pada tegangan operasi 5 V dan menggunakan kontroler HD44780 yang berfungsi untuk mengolah data karakter dari mikrokontroler menjadi tampilan pada layar. Komunikasi antara LCD dan mikrokontroler dilakukan melalui antarmuka I2C menggunakan dua jalur komunikasi yaitu SDA dan SCL, sehingga penggunaan pin pada Arduino menjadi lebih efisien.

2.13 Arduino Nano ATmega328P

Arduino Nano merupakan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem *embedded* dan otomasi karena memiliki ukuran yang kecil, konsumsi daya rendah, serta kemudahan dalam proses pemrograman. Arduino Nano dirancang untuk mendukung berbagai aplikasi sistem kontrol, sistem monitoring, serta pengolahan data sensor secara *real-time*.

Mikrokontroler ATmega328P yang digunakan pada Arduino Nano merupakan mikrokontroler 8-bit berbasis arsitektur. Mikrokontroler ini memiliki kemampuan pemrosesan yang cukup baik untuk berbagai aplikasi sistem tertanam (*embedded system*) dengan konsumsi daya yang relatif rendah. Menurut datasheet resmi Microchip [43], ATmega328P memiliki memori program berbasis *flash memory* yang memungkinkan pengguna untuk menyimpan program serta melakukan pemrograman ulang secara berulang.



Gambar 2.15 Arduino Nano ATmega328P

Dilihat pada gambar 2.14 Merupakan Arduino Nano, dengan Arsitektur *Reduced Instruction Set Computer* (RISC) dapat mengeksekusi instruksi secara efisien sehingga mampu memberikan kinerja yang cukup tinggi pada frekuensi kerja yang relatif rendah. ATmega328P juga dilengkapi dengan berbagai periferal internal seperti *timer*, *analog-to-digital converter* (ADC), *serial communication interface*, serta modul PWM yang sangat berguna dalam pengembangan sistem kendali.

Pada penelitian ini, Arduino Nano digunakan sebagai unit pengolah utama yang berfungsi untuk membaca data sensor, memproses algoritma *fuzzy logic*, serta mengendalikan perangkat keluaran seperti kipas pendingin dan layar tampilan.

Tabel 2.11 Spesifikasi Arduino Nano ATmega 328P[43]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Operasi	5	V
Tegangan Input	6 – 12	V
Flash Memory	32	KB
SRAM	2	KB
EEPROM	1	KB
Frekuensi Clock	16	MHz
Digital I/O Pins	20 pin	-
PWM Output	6 pin	-
Analog Input	8 pin	-
Komunikasi	UART, SPI, I2C	-

Berdasarkan Tabel 2.11, Arduino Nano berbasis mikrokontroler ATmega328P memiliki tegangan operasi sebesar 5 V. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan memori *flash* sebesar 32 KB untuk penyimpanan program, SRAM 2 KB untuk proses eksekusi data sementara, serta EEPROM 1 KB untuk penyimpanan data permanen. Arduino Nano bekerja pada frekuensi *clock* 16 MHz dan menyediakan 14 pin digital input/output, dimana 6 pin diantaranya mendukung sinyal PWM. Selain itu, terdapat 8 pin analog input serta dukungan komunikasi UART, SPI, dan I2C yang memungkinkan integrasi dengan berbagai sensor dan modul dalam sistem monitoring.