

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan listrik semakin banyak digunakan karena memiliki berbagai keunggulan dibandingkan kendaraan konvensional berbahan bakar fosil, terutama dalam hal efisiensi energi dan pengurangan emisi gas buang yang berbahaya bagi lingkungan (Maghfiroh, et al., 2021). Dalam sistem penggeraknya, kendaraan listrik menggunakan motor listrik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi elektromagnetik antara stator dan rotor. Salah satu jenis motor listrik yang banyak diterapkan sebagai penggerak utama pada kendaraan listrik adalah motor Brushless Direct Current (BLDC). Motor BLDC memiliki torsi besar, efisiensi tinggi, serta mampu bekerja dengan tingkat kebisingan dan getaran yang rendah karena tidak menggunakan sikat maupun komutator mekanis (Sachruddin, Samman, & Sadjad, 2021).

Motor BLDC terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator sebagai bagian diam dan rotor sebagai bagian yang berputar. Stator berisi lilitan yang dapat dikonfigurasi dalam bentuk bintang (star) atau delta, sementara rotor menggunakan magnet permanen sebagai sumber medan magnet. Terdapat dua jenis penempatan rotor pada motor BLDC, yaitu inner rotor (in-runner) dan outer rotor (outrunner), di mana tipe inner rotor memiliki inersia rendah dan pendinginan yang lebih baik, sedangkan outer rotor lebih ekonomis untuk produksi massal. Prinsip kerja motor BLDC bergantung pada proses komutasi elektronik menggunakan sensor posisi rotor seperti sensor Hall atau metode sensorless berbasis back-EMF untuk menentukan urutan penyalaan kumparan (Hidayat, Samman, & Sadjad, 2022).

Untuk mengatur kecepatan dan arah putaran motor BLDC, digunakan sistem pengendali elektronik berbasis mikrokontroler, CPLD, atau FPGA. Pengendali ini berfungsi menghasilkan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang dikirimkan ke rangkaian driver atau inverter untuk mengatur tegangan fasa motor. Mikrokontroler seperti STM32 juga banyak diaplikasikan karena memiliki kemampuan pemrosesan digital cepat, timer kontrol lanjutan, dan ADC resolusi tinggi yang mendukung implementasi kontrol motor secara real-time (Wang, Guo, & Dun, 2015).

Meskipun motor BLDC memiliki efisiensi tinggi dan keandalan yang baik, beberapa tantangan masih perlu diatasi, seperti munculnya cogging torque yang



an dan penurunan performa motor. Fenomena ini dapat optimasi desain geometri stator dan rotor, penggunaan material tinggi, serta penerapan algoritma kontrol canggih seperti field- () atau direct torque control (DTC) (Ferdyanto, Fatwa, Erlangga, Selain itu, efisiensi sistem keseluruhan juga ditentukan oleh ly yang biasanya menggunakan konverter DC-DC seperti buck boost converter untuk menjaga kestabilan tegangan pada driver.

Kombinasi desain motor yang optimal, sistem kontrol adaptif, dan pengaturan daya yang efisien menjadikan motor BLDC sebagai solusi unggul dalam pengembangan kendaraan listrik modern (Sithananthan, Poad, Bakar, & Salimin, 2024).

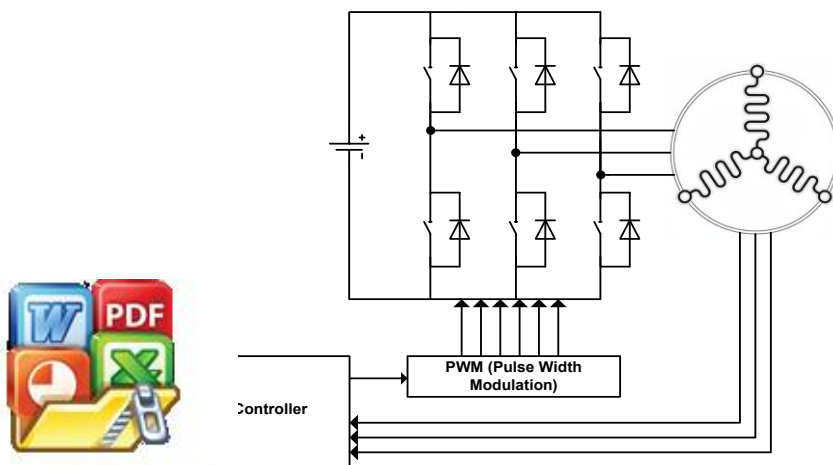
1.2 Landasan Teori

Penelitian ini didasarkan pada beberapa konsep dan teori yang relevan, yang dijelaskan sebagai berikut.

1.2.1 Motor BLDC

Motor Brushless DC (BLDC) memiliki struktur dasar yang terdiri dari dua komponen utama, yaitu stator dan rotor. Stator umumnya berupa kumparan lilitan tiga fasa yang dihubungkan dalam konfigurasi bintang (star), sedangkan rotor terdiri dari magnet permanen yang menghasilkan medan magnet tetap. Prinsip kerja motor ini didasarkan pada interaksi antara medan magnet permanen pada rotor dan medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan stator yang dikontrol secara elektronik. Dalam sistem kontrol BLDC, terdapat empat elemen utama, yaitu motor BLDC itu sendiri, inverter tiga fasa, sensor posisi, dan mikrokontroler sebagai unit pengendali utama.

Mikrokontroler berperan dalam menghasilkan sinyal PWM (Pulse Width Modulation) yang dikirim ke rangkaian driver MOSFET untuk mengatur arus pada masing-masing fasa stator sesuai urutan komutasi. Urutan ini bergantung pada informasi posisi rotor yang diperoleh dari sensor Hall atau ditentukan melalui metode sensorless. Saat arus mengalir ke kumparan tertentu, medan magnet yang dihasilkan akan menarik atau menolak kutub magnet rotor, menghasilkan rotasi yang kontinu. Proses ini terjadi berulang dengan frekuensi tinggi, menciptakan pergerakan yang halus dan torsi yang stabil. Dengan pengaturan duty cycle PWM dan pola komutasi yang sesuai, sistem kontrol elektronik memungkinkan pengaturan kecepatan dan arah putaran motor BLDC secara presisi dan efisien.



Gambar 1. Prinsip Kerja Motor BLDC



Kerja motor BLDC pada dasarnya terdiri dari tiga tahap: deteksi posisi rotor, komutasi elektronis, dan pengaturan kecepatan. Posisi rotor dibaca oleh sensor Hall, yang memberikan sinyal ke mikrokontroler untuk menentukan urutan komutasi enam langkah pada tiap fase motor. Kecepatan diatur melalui duty cycle PWM, di mana semakin besar duty cycle, semakin tinggi tegangan efektif dan kecepatan putaran motor. Dengan kontrol tertutup, sistem dapat menyesuaikan arus sesuai beban sehingga torsi lebih stabil dan efisien. Kombinasi proses ini membuat motor BLDC memiliki efisiensi tinggi, respon cepat, dan keandalan lebih baik dibanding motor DC konvensional.

1.2.2 Power Supply

Sistem catu daya pada pengendali motor umumnya dirancang menggunakan pendekatan bertingkat untuk memastikan setiap blok rangkaian memperoleh suplai yang stabil dan sesuai kebutuhan. Tegangan utama dari sumber daya eksternal terlebih dahulu melalui tahap penyaringan yang berfungsi meredam ripple, gangguan elektromagnetik, dan lonjakan arus akibat perubahan beban motor. Tahap ini biasanya memanfaatkan kombinasi kapasitor elektrolit, kapasitor keramik, serta elemen proteksi yang menjaga kestabilan suplai sebelum dialirkan ke modul konversi daya berikutnya.

Setelah melalui proses penyaringan awal, tegangan kemudian diturunkan atau dinaikkan menggunakan regulator atau konverter daya yang disesuaikan untuk kebutuhan rangkaian driver, logika digital, sensor, maupun sistem kontrol lainnya. Setiap jalur regulasi dilengkapi dengan kapasitor bypass untuk menjaga kestabilan, meningkatkan respon transien, dan meminimalkan noise yang dapat mengganggu kinerja pengendali motor. Dengan arsitektur catu daya bertingkat seperti ini, seluruh subsistem dapat bekerja secara optimal dan terisolasi dari gangguan listrik yang umum terjadi pada sistem berbasis aktuator dan motor.

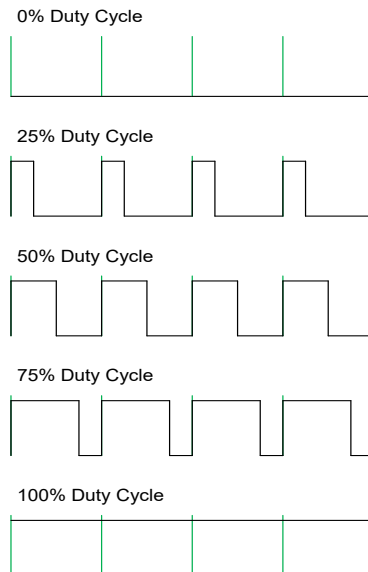
1.2.3 Pulse Width Modulation

PWM (Pulse Width Modulation) merupakan teknik modulasi yang digunakan untuk mengendalikan daya dengan cara mengatur lebar pulsa sinyal pada frekuensi tinggi, biasanya antara 40 hingga 100 kHz, sehingga menghasilkan gelombang keluaran yang halus dan efisien. Dalam sistem pengendali motor BLDC, PWM berfungsi untuk mengatur kecepatan dan torsi motor dengan menentukan durasi MOSFET dalam kondisi aktif (on) dan tidak aktif (off) pada setiap periode sinyal. Semakin besar duty cycle yang diberikan, semakin tinggi tegangan rata-rata yang



berdampak pada peningkatan kecepatan putaran. Sebaliknya, kecil menurunkan tegangan efektif dan memperlambat rotasi. Sama teknik ini terletak pada efisiensinya yang tinggi (mencapai efisiensi energi yang rendah, serta kemampuannya untuk mengontrol motor tanpa menghasilkan rugi panas yang signifikan. Dengan demikian metode yang sangat andal dan hemat energi untuk aplikasi

pengaturan kecepatan dan daya pada sistem motor listrik modern, termasuk motor BLDC.



Gambar 2. Sinyal pulse width modulation

1.2.4 Komutasi

Motor BLDC melakukan komutasi secara elektronik dengan memanfaatkan saklar daya sebagai pengganti sikat mekanis. Komutasi terjadi ketika arus berpindah dari satu fasa ke fasa berikutnya. Pada saat perpindahan ini, arus pada fasa yang sedang mati tidak langsung turun, dan arus pada fasa yang baru aktif tidak segera meningkat, sehingga menimbulkan penurunan torsi sesaat. Selama proses tersebut, arus pada fasa yang dimatikan berangsur berkurang, sedangkan arus pada fasa yang diaktifkan perlahan meningkat.

Komutasi motor BLDC ditentukan oleh pola sensor hall dan disebut komutasi enam langkah. Komutasi enam langkah merupakan metode kontrol motor BLDC yang juga dikenal sebagai komutasi trapesoidal. Disebut "enam langkah" karena terdapat enam langkah dalam urutan komutasi untuk menyelesaikan satu siklus listrik (360°). Proses komutasi atau pengalihan arus ke belitan stator berikutnya terjadi setiap 60 derajat listrik (Sachruddin, Samman, & Sadjad, 2021). Berikut ini pola komutasi enam langkah yang umumnya.



in salah satu parameter utama dalam menentukan performanya pada aplikasi kendaraan listrik seperti skuter listrik yang nuan akselerasi dan daya dorong yang memadai. Pada motor ent (BLDC), torsi dihasilkan dari interaksi antara medan magnet

stator yang dibangkitkan oleh arus listrik pada kumparan dan medan magnet rotor permanen. Besarnya torsi yang dihasilkan dipengaruhi oleh arus yang mengalir pada lilitan stator, karakteristik motor, serta metode pengendalian yang digunakan. Oleh karena itu, pengendalian torsi menjadi aspek penting dalam perancangan sistem pengendali motor BLDC untuk memastikan motor mampu bekerja secara efisien dan stabil pada berbagai kondisi operasi.

Secara matematis, torsi motor BLDC dapat ditentukan berdasarkan hubungan antara daya mekanik yang dihasilkan motor dan kecepatan sudut putaran. Hubungan tersebut dinyatakan melalui persamaan torsi sebagai berikut:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (1.1)$$

$$\omega = \frac{2\pi.RPM}{60} \quad (1.2)$$

dengan:

- T= torsi motor (Nm)
- P= daya mekanik keluaran motor (W)
- ω = kecepatan sudut motor (rad/s)
- RPM = kecepatan putar motor (putaran/menit)

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh duty cycle PWM terhadap efisiensi motor BLDC?
2. Bagaimana hubungan duty cycle PWM terhadap kecepatan putaran dan waktu transisi sensor Hall?
3. Bagaimana pengaruh duty cycle PWM terhadap kenaikan temperatur motor dan sistem penggerak?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh duty cycle PWM terhadap efisiensi motor BLDC.
2. Mengetahui hubungan duty cycle PWM terhadap kecepatan putaran dan waktu transisi sensor Hall.
3. Mengetahui pengaruh duty cycle PWM terhadap kenaikan temperatur motor dan sistem penggerak.



an

harapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:
 eksperimental terkait parameter yang mempengaruhi
 dali motor BLDC.

2. Menjadi referensi dalam pengembangan sistem pengendali motor BLDC yang lebih efisien dan stabil.

1.6 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Pengujian dilakukan pada motor BLDC tanpa beban.
2. Suplai daya yang digunakan yaitu 36V/10A dan 24V/10A.
3. Parameter terukur yang diuji terbatas pada efisiensi daya, kecepatan putaran, waktu transisi sensor hall, dan temperatur operasional.
4. Mikrokontroler yang digunakan yaitu STM32 Blackpill.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 hingga Januari 2026. Seluruh proses penelitian mulai dari perancangan sistem hingga analisis hasil eksperimen dilakukan di Laboratorium Elektronika dan Divais, Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini, digunakan berbagai alat dan bahan yang mendukung proses penelitian, yaitu sebagai berikut.

1. Prototipe Pengendali Motor BLDC, yaitu perangkat keras yang dirancang dan digunakan untuk mengendalikan motor BLDC.
2. Motor BLDC, digunakan sebagai penggerak utama prototipe pengendali motor BLDC.
3. Potensio, digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC.
4. *Power Supply*, digunakan sebagai suplai tegangan tetap pada sistem.
5. Komputer, digunakan untuk melakukan proses perancangan sistem dan pengolahan data.
6. Osiloskop, digunakan untuk menampilkan data pada prototipe yang dianalisis.
7. Takometer, digunakan untuk mengukur kecepatan motor BLDC.
8. Kamera termal, digunakan untuk mengukur temperatur komponen pada prototipe.
9. Multimeter digital, digunakan untuk mengukur parameter yang diinginkan.
10. *Power analyzer*, digunakan untuk menganalisis dan menampilkan data yang berhubungan dengan daya listrik.
11. *Software* altium designer, digunakan untuk merancang PCB.
12. *Software* STM32CubeIDE, digunakan untuk membuat program sistem pengendali motor BLDC.

2.3 Alur Penelitian

Alur penelitian ini menjelaskan tahapan – tahapan penelitian yang dimulai dari studi literatur hingga menghasilkan kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian.

2.3.1 Studi Literatur



lakukan pengumpulan dan pengkajian berbagai referensi yang penelitian. Selain itu, penulis juga menganalisis persamaan a metode yang digunakan dan hasil yang diperoleh pada ikan.

2.3.2 Perancangan Sistem

Tahapan ini mencakup perancangan *hardware* dan perancangan *software* pada sistem.

2.3.3 Eksperimen dan Pengambilan Data

Pada tahap ini dilakukan serangkaian eksperimen untuk menguji performa dari prototipe yang telah dibuat. Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh parameter – parameter yang akan dianalisis. Data diperoleh dengan menggunakan alat ukur seperti osiloskop, power analyzer, tachometer dan kamera thermal.

2.3.4 Analisis Hasil Eksperimen

Data yang telah diperoleh kemudian dianalisis untuk menilai apakah prototipe bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Analisis hasil eksperimen mencakup perbandingan antara beberapa parameter, serta evaluasi kelebihan dan kekurangan dari kinerja prototipe.

2.3.5 Kesimpulan

Tahap akhir dari alur penelitian yaitu menarik kesimpulan yang mencakup pencapaian tujuan penelitian, efektivitas prototipe, serta potensi pengembangan prototipe kedepannya.

