

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Kebutuhan akan energi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan kebutuhan konsumen, dan saat ini, Bahan Bakar Minyak (BBM) dominan sebagai sumber energi di seluruh dunia. Namun, tantangan utama yang dihadapi oleh banyak negara adalah keterbatasan energi fosil karena semakin menipisnya persediaannya. Indonesia sendiri menghadapi masalah serius dalam menyediakan cukup BBM, bahkan harus mengimpor dari negara lain, yang dapat berdampak negatif pada kebutuhan energi untuk populasi yang terus berkembang (Muslimin et al., 2023). Untuk mengatasi masalah ini, pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi solusi alternatif yang sangat relevan. Energi terbarukan perlu diperluas penggunaannya, terutama dengan meningkatnya harga BBM yang terus naik. Salah satu contoh yang paling menonjol adalah pemanfaatan energi listrik. Motor listrik telah menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi kendaraan listrik dan berbagai aplikasi industri (Markovic et al., 2007). Salah satu jenis motor listrik yang semakin populer adalah motor BLDC. Keunggulan BLDC melibatkan keandalan, efisiensi tinggi, dan pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan dengan motor konvensional. Seiring dengan peningkatan kebutuhan akan motor listrik berdaya tinggi, penelitian dan pengembangan terkait desain motor BLDC menjadi semakin penting (Bogdan et al., 2021).

Motor BLDC menjadi komponen vital dalam bidang transportasi. Meskipun motor BLDC 2kW telah digunakan secara luas dalam bidang transportasi, masih terdapat berbagai tantangan yang perlu dipecahkan untuk memastikan kinerja dan efisiensi. Beberapa masalah yang dihadapi adalah efisiensi yang rendah, hilangnya energi akibat gesekan, perbedaan antara daya aktual dan daya nominal, dan efek pemanasan berlebih yang dapat mengurangi masa pakai motor BLDC. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan pengembangan untuk meningkatkan efisiensi motor BLDC 2kW (Kendaraan & Hub, 2016). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan

bahwa variasi perbandingan winding pada motor BLDC dapat memiliki dampak yang signifikan pada kinerja motor, termasuk efisiensi yang dapat dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan sistematis untuk merancang motor BLDC dengan mempertimbangkan secara khusus perbandingan winding untuk mencapai kinerja yang lebih efisien (Faridhoni & Fahrizal, 2022). Dalam konteks ini, penelitian mengenai rancang bangun motor BLDC 2kW untuk kendaraan Listrik e-scooter, Desain motor BLDC menjadi aspek utama untuk memastikan efisiensi tinggi dalam berbagai aplikasi.

Salah satu faktor yang memengaruhi desain motor BLDC adalah konfigurasi winding. Selain itu, pencapaian efisiensi menjadi fokus penting untuk memastikan motor dapat menghasilkan tenaga sesuai dengan kebutuhan (Manufaktur et al., 2023). Pemerintah telah mengeluarkan regulasi dan kebijakan untuk mendorong penggunaan motor BLDC 2KW yang lebih efisien. Pada kaitannya dengan efisiensi energi, motor BLDC 2kW telah menjadi perhatian utama dalam implementasi regulasi pemerintah. Meskipun memiliki daya yang relatif kecil dibandingkan dengan motor BLDC lainnya, penggunaan motor BLDC 2kW yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan energi yang signifikan. Oleh karena itu, Peningkatan efisiensi motor BLDC 2kW menjadi suatu hal yang krusial guna memenuhi regulasi yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Dalam penelitian ini akan dilakukan pengembangan BLDC inwheel motor dengan membuat prototype menggunakan hasil simulasi parameter jumlah slot stator 48 dan pole magnet 40 agar bisa mendapatkan hasil yang lebih efisien dan bisa digunakan pada kendaraan listrik (Toker et al., 2022).

## 1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi jumlah kawat, konfigurasi belitan dan ukuran kawat terhadap motor BLDC?
2. Bagaimana implementasi jumlah lilitan, jumlah putaran dan ukuran kawat tembaga pada BLDC?
3. Bagaimana Evaluasi hasil dan analisis motor BLDC ?

## 1.3. Tujuan Penelitian

1. Melakukan simulasi Ansys Motor-Cad dengan variasi winding dengan jumlah kawat 6,7,8 dengan variasi belitan pertama 6,7,8 menggunakan tembaga 0.5 mm, kemudian variasi belitan kedua 3,4,5 dengan tembaga 0,7.
2. Mengimplementasikan motor BLDC dengan memperhatikan jumlah lilitan, jumlah putaran lilitan, serta ukuran kawat tembaga yang digunakan.
3. Melakukan evaluasi dan analisis terhadap performa motor BLDC 2kW.

## 1.4. Batasan dan Asumsi Penelitian

Batasan masalah untuk tugas akhir dengan judul "Rancang Bangun Motor BLDC 2kW Untuk Kendaraan Listrik e-scooter Sesuai Kebutuhan Indonesia" dapat dijelaskan sebagai berikut:

### 1) Daya dan Ukuran Motor:

Fokus penelitian terbatas pada motor BLDC dengan daya keluaran daya sebesar 2kW. Parameter fisik lainnya, seperti ukuran fisik motor, juga menjadi bagian dari batasan masalah.

### 2) Jenis Aplikasi:

Penelitian ini akan mempertimbangkan motor BLDC untuk aplikasi pada kendaraan listrik *e-scooter*.

### 3) Variasi Konfigurasi Winding:

Penelitian akan membatasi variasi konfigurasi *winding* pada motor BLDC, dengan fokus pada efek perbedaan terhadap motor BLDC. Dengan menggunakan kawat SWG berdiameter 0.5mm dan 0.7mm. Kawat yang digunakan berjumlah 6, 7, dan

8 (dengan variasi lilitan berjumlah 6, 7, dan 8 ). Sedangkan pada kawat 0.7 menggunakan variasi lilitan berjumlah 3, 4, dan 5.

#### 4) Material dan Komponen Motor:

Penelitian akan mempertimbangkan material dan komponen motor BLDC yang umum digunakan, tanpa memasukkan komponen baru sebagai bagian dari rancang bangun, sebagai berikut baterai 72v 20 ah, kontroler 50A.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Berikut adalah Manfaat Penelitian yang telah diselaraskan dengan Tujuan Penelitian yang Anda berikan:

#### 1. Mendukung Analisis Simulasi dengan Ansys Motor-CAD

- Menyediakan data mengenai pengaruh variasi jumlah lilitan (6, 7, 8) dan ukuran kawat tembaga (0.5 mm dan 0.7 mm) terhadap performa motor BLDC melalui simulasi.

- Memudahkan analisis hubungan antara variasi winding dengan konsumsi daya dan efisiensi motor sebelum implementasi nyata.

#### 2. Membantu Implementasi Motor BLDC

- Memberikan panduan praktis dalam pemilihan konfigurasi jumlah lilitan, jumlah putaran lilitan, dan ukuran kawat tembaga yang optimal untuk motor BLDC 2kW.

- Menghasilkan data eksperimen yang dapat dijadikan referensi dalam desain motor BLDC dengan karakteristik daya dan efisiensi yang lebih baik.

#### 3. Evaluasi dan Analisis Kinerja Motor BLDC 2kW

- Memberikan pemahaman lebih dalam mengenai performa motor BLDC dengan variasi winding melalui pengukuran parameter seperti konsumsi arus, torsi, dan efisiensi.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Penelitian ini dilakukan untuk merancang dan membangun motor BLDC 2kW untuk kendaraan listrik e-scooter yang sesuai dengan standar konversi sepeda listrik Indonesia. Metode penelitian yang digunakan meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

### **1. Studi Literatur**

- Mengumpulkan dan mempelajari literatur yang relevan tentang motor BLDC, e-scooter, dan standar konversi sepeda listrik di Indonesia.
- Mengidentifikasi spesifikasi teknis dan persyaratan standar yang harus dipenuhi oleh motor BLDC 2kW untuk e-scooter.

### **2. Desain dan Simulasi**

- Menggunakan software ANSYS MotorCAD untuk merancang motor BLDC 2kW.
- Melakukan simulasi elektromagnetik untuk menganalisis kinerja motor, termasuk efisiensi, torsi, dan daya keluaran.
- Mengoptimalkan desain motor dengan variasi pada konfigurasi winding, jumlah belitan, dan ukuran kawat.

### **3. Pembuatan Prototipe**

- Berdasarkan hasil desain dan simulasi, dibuat prototipe motor BLDC 2kW.
- Menggunakan bahan dan komponen yang sesuai untuk memastikan kualitas dan kinerja motor.

### **4. Pengujian dan Validasi**

- Melakukan uji performa prototipe motor BLDC di laboratorium, mengukur parameter seperti efisiensi, torsi, kecepatan, dan daya keluaran.
- Menguji motor dalam berbagai kondisi operasional untuk memastikan kinerjanya sesuai dengan standar konversi sepeda listrik Indonesia.

- Membandingkan hasil pengujian dengan hasil simulasi untuk validasi.

#### 5. Analisis Data

- Menganalisis data hasil pengujian untuk mengevaluasi kinerja motor BLDC.
- Membuat perbandingan antara motor yang telah dirancang dengan hasil simulasi yang dilakukan.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

Pada bab 2 kajian Pustaka memiliki beberapa studi literatur penelitian sebelumnya berupa jurnal pendukung dan referensi dalam menyelesaikan penelitian. Adapun hasil dari penelitian tentang whellhub yang bisa dilihat pada tabel II.I.

*Tabel II. I State of the art*

Penulis	Usulan Solusi	Hasil
12	Analisis dan perhitungan dilakukan untuk mendapatkan grafik output berupa stator current, rotor speed, electromagnetic torque, dan DC bus voltage(12).	Dari hasil pengujian, motor DC menunjukkan torsi yang lebih besar dan RPM yang sedikit bertambah setelah proses rewiring dan recoiling.
13	Desain motor dengan satu stator dan dua rotor serta konfigurasi 24 core stator dan 20 magnet pole per rotor dapat diadopsi untuk aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dan performa optimal.	Trendline yang menunjukkan kemampuan motor untuk mencapai daya output 2000 watt dan torsi rated 3,8 Nm pada 2790 rpm memberikan panduan bagi pengembangan motor dengan spesifikasi daya dan torsi yang lebih tinggi.
17	Mengembangkan sistem multi-motor BLDC yang bekerja secara paralel untuk meningkatkan torsi	Menguji berbagai konfigurasi dan parameter untuk menemukan kombinasi

Penulis	Usulan Solusi	Hasil
	dan kinerja kendaraan listrik.	optimal yang menghasilkan torsi maksimal tanpa mengorbankan efisiensi energi.
9	Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter desain optimal pada motor Brushless DC 1kW jenis radial dengan rotor luar, dengan fokus pada minimalisasi torsi cogging, serta memaksimalkan torsi rating dan efisiensi.	Desain optimal ini menghasilkan torsi cogging 39.162% lebih rendah, torsi rating 10.832% lebih rendah, dan efisiensi meningkat 10.515% menjadi 92.07%.
10	Makalah ini berfokus pada desain dan optimisasi motor BLDC (Brushless DC) untuk kendaraan bertenaga kecil. Desain dibatasi oleh dimensi yang diperlukan untuk roda berukuran 12 inci menggunakan konsep penggerak langsung.	Analisis parametrik dilakukan menggunakan perangkat lunak khusus untuk mendapatkan solusi mekanis yang optimal dan konfigurasi elektromagnetik yang baik. Optimisasi mempertimbangkan konstruksi slot yang miring, yang membantu meningkatkan torsi cogging dan meningkatkan kecepatan motor pada torsi resistansi rendah.

Penulis	Usulan Solusi	Hasil
		Desain motor akhir memiliki 24 slot stator dan 22 magnet permanen rotor.

## 2.1. Objek Penelitian

Motor BLDC adalah motor listrik yang handal dikenal karena umurnya yang panjang dan efisiensinya, yang disebabkan oleh ketiadaan sikat. Efisiensi tinggi dan kinerjanya membuatnya menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi, seperti kendaraan listrik dan peralatan industri (Fawaid, 2019). Motor BLDC dapat memberikan torsi maksimal pada RPM rendah, yang secara bertahap menurun seiring dengan peningkatan RPM. Sektor operasional utama dari motor BLDC melibatkan sensor hall yang dipasang pada stator. Sensor hall mendeteksi medan magnet, membedakan antara kutub utara dan selatan yang dihadapinya. Terletak di antara elektromagnet, sensor hall menonaktifkan gulungan saat mendeteksi medan magnet kutub selatan dan mengaktifkannya saat mendeteksi ketiadaan medan magnet kutub selatan. Kedua gulungan membagi kutub yang sama, baik utara maupun selatan (Muslimin et al., 2023). Motor listrik merupakan salah satu komponen utama dalam sistem penggerak elektrik. Motor listrik memiliki berbagai jenis, salah satunya adalah motor BLDC yang akan menjadi fokus penelitian ini. Motor listrik memiliki beberapa komponen utama, antara lain (Faridhoni & Fahrizal, 2022).

Motor listrik merupakan komponen utama yang mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanis yang menggerakkan roda sepeda motor atau komponen lainnya. Baterai, berperan sebagai sumber energi utama yang digunakan untuk menggerakkan motor dan mengoperasikan seluruh sistem elektronik pada sepeda motor listrik. Kontroler berfungsi untuk mengatur arus listrik yang mengalir dari baterai ke motor elektrik Motor listrik juga memiliki berbagai jenis, seperti motor listrik tiga fasa yang banyak digunakan dalam industri (Kendaraan & Hub, 2016). Motor listrik tiga fasa merupakan salah satu jenis motor induksi yang berfungsi

merubah energi listrik menjadi energi gerak. Pengendalian motor listrik tiga fasa bertujuan untuk mengoperasikan motor listrik secara perlahan hingga pada kecepatan penuh dengan mengurangi tegangan masuk pada start awal dan menaikkannya ke tegangan nominal ketika motor sudah mulai berjalan (Çabuk et al., 2019).

## 2.2 Brushless DC Motor (BLDC)

Motor BLDC merupakan motor yang digunakan saat memerlukan keandalan tinggi karena motor ini tidak menggunakan sikat sehingga ini memiliki ketahanan ,serta memiliki efisiensi yang tinggi, motor BLDC juga memiliki performa saat beroperasi karena dapat memberikan torsi pada kecepatan yang rendah, sehingga saat beroperasi motor BLDC dapat menghasilkan torsi yang maksimal (Jannus et al., 2021). Operasi utama motor BLDC adalah hall sensor yang terpasang pada statornya. Hall sensor akan menghadap magnet secara tegak lurus dan dapat membedakan kutub Selatan atau kutub utara yang dilintasinya. Secara umum konstruksi utama motor BLDC terdiri dari stator, kumparan, rotor, poros, magnet permanen, dan *hall sensor* yang tampak seperti gambar II.1.



**Gambar II. 1** Brusshless DC Motor

## 2.3 Kriteria Motor Listrik Sebagai Sistem Propulsi Kendaraan

Kriteria motor listrik sebagai sistem propulsi kendaraan merujuk pada sejumlah faktor atau karakteristik yang harus dipertimbangkan saat memilih atau mengevaluasi motor listrik yang akan digunakan sebagai penggerak utama atau propulsi pada kendaraan. Pemilihan motor listrik untuk sistem propulsi kendaraan tidak hanya bergantung pada kekuatan motor itu sendiri, Struktur dasar kendaraan Listrik bisa di lihat pada gambar II.2.



**Gambar II. 2** Konsep Dasar Motor Listrik

Tetapi juga pada sejumlah aspek lain yang mempengaruhi kinerja, efisiensi, dan keandalan kendaraan listrik secara keseluruhan. Berikut adalah beberapa kriteria penting yang harus dipertimbangkan:

1. Daya dan Torsi:

Daya Motor: Kemampuan motor menghasilkan daya yang cukup untuk mendorong kendaraan dengan performa yang diinginkan.

Torsi Motor: Kemampuan motor menghasilkan torsi yang cukup untuk mengatasi hambatan dan memastikan percepatan yang memadai.

2. Efisiensi Energi:

Seberapa baik motor dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanis tanpa kehilangan yang signifikan.

3. Kontrol dan Responsif:

Kemampuan Kontrol: Kemampuan untuk mengontrol kecepatan dan arah dengan presisi tinggi.

Responsif: Seberapa cepat motor dapat merespons perubahan dalam permintaan daya atau torsi.

4. Umur Pakai dan Keandalan:

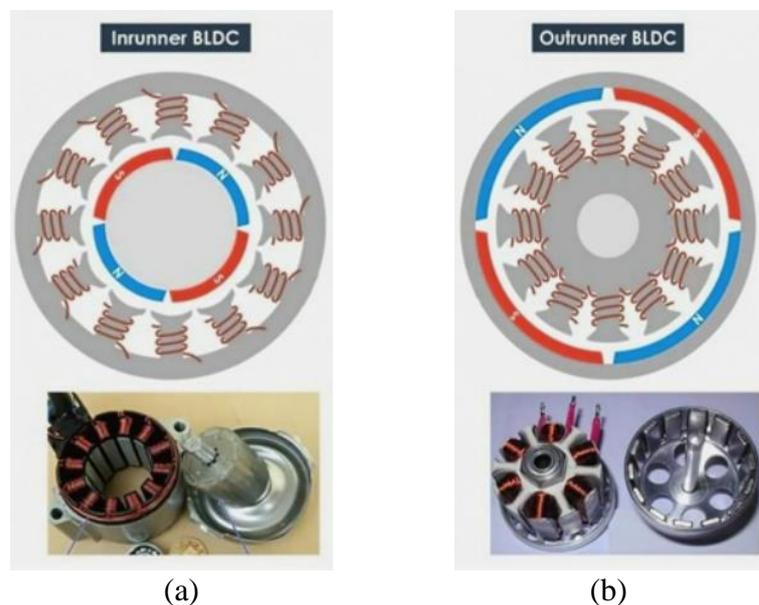
Berapa lama motor dapat beroperasi dan pemeliharaan atau penggantian part motor.

**2.3.1 Jenis Motor BLDC**

Motor BLDC terdiri dari rotor yang terbuat dari magnet permanen dan stator yang terdiri dari kumparan yang digulung pada struktur lapisan plat besi. Terdapat dua tipe motor BLDC, yang pertama adalah *Inside Rotor*, di mana rotor berada di tengah

dan stator di luar. Yang kedua adalah *Outside Rotor*, di mana rotor berada di luar dan stator di tengah. Meskipun prinsip kerjanya sama, namun terdapat perbedaan dalam kecepatan dan torsi. Rotor yang berada di luar menghasilkan torsi lebih besar namun dengan kecepatan lebih lambat dibandingkan dengan rotor yang berada di dalam. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jumlah magnet pada rotornya. Semakin banyak magnet pada rotor, maka setiap langkah pergerakannya menjadi lebih kecil, memerlukan pergerakan lebih banyak dalam satu putaran (Bogdan et al., 2021).

BLDC motor memiliki berbagai topologi, tetapi secara umum dapat dibagi menjadi dua berdasarkan letak rotor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.3.



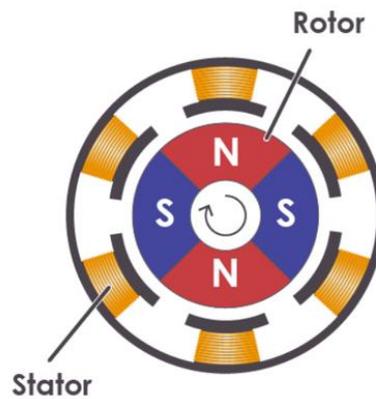
**Gambar II. 3** (a) Inner rotor (b) Outer Rotor

Jika dilihat dari tata letak permanen magnet, umumnya BLDC motor memiliki tipe topologi *surface-mounted* dengan konfigurasi lilitan seperti *concentrated non overlapping* dan *fractional-slot*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.3 Dengan konfigurasi tersebut, sisa lilitan menjadi lebih pendek, menghasilkan rendahnya kerugian tembaga dan potensi *power* densitas yang lebih tinggi.

#### a) Desain *Inner Rotor*

Pada gambar II.4 desain rotor dalam, rotor berada di tengah motor dan belitan stator mengelilingi rotor. Karena rotor terletak pada inti magnet, rotor tidak mengisolasi panas di dalam dan panas mudah hilang. Oleh karena itu, motor yang dirancang

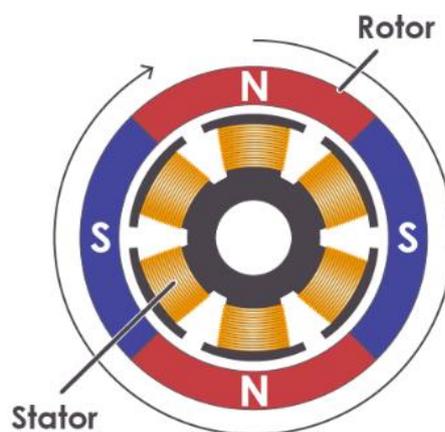
dengan rotor bagian dalam mampu menghasilkan torsi yang besar dan digunakan secara efektif.



**Gambar II. 4** Kontruksi Inner Rotor

#### b) Desain Outer Rotor

Pada gambar II.5 desain rotor luar, rotor mengelilingi belitan yang terletak pada inti motor. Magnet di rotor menahan panas di dalam motor dan tidak membiarkan panas itu hilang dari motor. Jenis motor yang dirancang seperti itu beroperasi pada arus pengenal yang lebih rendah dan memiliki *cogging* torsi yang rendah (Sumantri & Nuryadi, 2019).



**Gambar II. 5** Kontruksi Outer Rotor

#### 2.3.2 Keunggulan Motor BLDC

Salah satu pengemudi yang paling umum diterapkan dalam kendaraan listrik adalah motor arus searah tanpa sikat (BLDC) karena motor tersebut

memperlihatkan keunggulan dalam torsi dan kecepatan tinggi, serta kemudahan dalam proses instalasinya. Banyak penelitian telah dilakukan oleh para ahli terkait motor BLDC, mencakup topik seperti pengaturan kecepatan BLDC, pengaruh beban pada motor BLDC, dan aspek-aspek motor sejenis lainnya. Artikel ini akan mendalami penelitian terkait pengaturan kecepatan motor DC tanpa sikat dengan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) (Saputra, 2021). Prinsip dasar PWM mengatur siklus kerja yang dihasilkan oleh *mikrokontroler* untuk mengontrol inverter tiga fasa. Keunggulan motor BLDC yang akan dicermati melibatkan:

1) Torsi Tinggi:

Motor BLDC dikenal memiliki torsi yang tinggi, meningkatkan kemampuannya untuk mengatasi tuntutan beban yang beragam.

2) Kecepatan Tinggi:

Keunggulan lainnya adalah kemampuan motor BLDC untuk mencapai kecepatan tinggi, memungkinkan kinerja yang efisien dalam berbagai aplikasi kendaraan listrik.

3) Instalasi yang Mudah:

Motor BLDC memperlihatkan keunggulan dalam proses instalasi yang sederhana, menyediakan kemudahan dalam penerapannya pada kendaraan listrik.

### **2.3.3 Keunggulan *Whellhub* Pada Kendaraan Listrik**

*Wheelhub* motor merupakan jenis motor listrik yang ditempatkan di roda kendaraan. Keunggulan penggunaan *whellhub* motor melibatkan pemindahan berat yang optimal, memungkinkan distribusi berat yang merata di seluruh kendaraan dan meningkatkan stabilitas. Desainnya yang sederhana menghilangkan kebutuhan untuk sistem transmisi dan komponen-komponen terkait, menghasilkan desain kendaraan yang lebih ringkas. Efisiensi energi yang tinggi tercapai karena *whellhub* motor memberikan daya langsung ke roda, mengurangi kehilangan energi selama transfer daya dan meningkatkan efisiensi baterai. Banyak keunggulan yang dimiliki oleh motor *wheelhub* dibandingkan dengan motor *mid-drive*. Dalam konteks penggunaan di jalan raya, pemasangan *wheelhub* sangat sederhana karena hanya memerlukan penyesuaian pada *arm*, berbeda dengan motor *mid-drive* yang

melibatkan banyak perubahan, seperti perpindahan gear dan penyesuaian roda (Sudjoko, 2021). *Wheelhub* lebih cocok digunakan pada motor dengan pemakaian sehari-hari di jalan raya yang dapat dilihat pada gambar II.7, sementara *mid-drive* lebih sesuai untuk motor dengan gigi atau motor tipe *off-road*, yang dapat dilihat pada gambar II.6.



*Gambar II. 6 Motor Mid-drive*

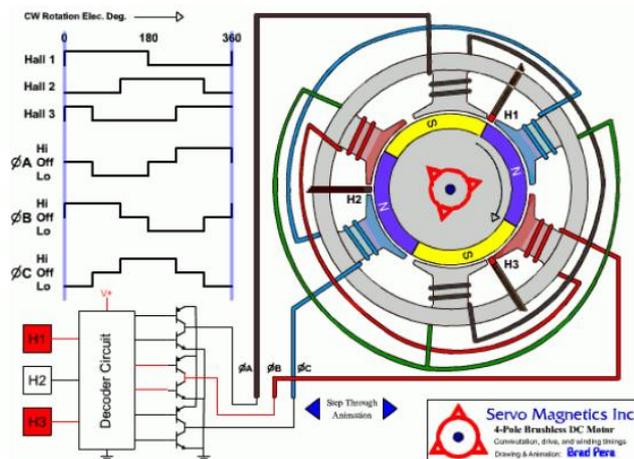


*Gambar II. 7 Motor Motor Wheelhub*

## **2.4 Prinsip Kerja Motor BLDC**

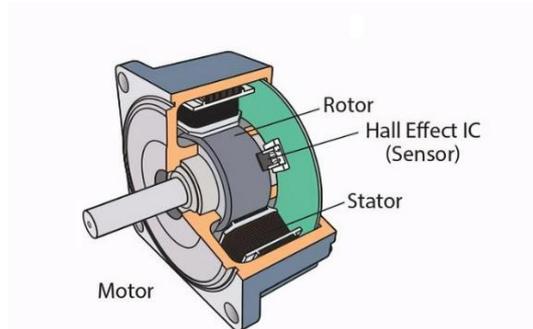
Prinsip kerja motor Brushless DC (BLDC) bergantung pada konsep dasar *elektromagnetisme* dan prinsip motor listrik. Motor BLDC menggunakan kombinasi medan magnet permanen pada rotor dan kumparan-kumparan yang terletak pada stator untuk menciptakan gerakan rotasi. Proses kerja motor BLDC melibatkan beberapa tahap utama, seperti komutasi elektronik yang menggantikan penggunaan sikat dan komutator, medan magnet permanen pada rotor dengan pola kutub bergantian, kumparan-kumparan simetris di sekitar rotor pada stator yang dikendalikan oleh unit pengendali, dan komutasi yang didasarkan pada posisi rotor

yang diperoleh dari sensor posisi. Selain itu, perubahan arus pada kumparan stator menciptakan medan magnet berputar, mendorong rotor untuk bergerak. Umpan balik dari sensor posisi memungkinkan pengendali untuk mengatur arus dengan tepat, memastikan kestabilan dan konsistensi gerakan rotasi (Tosun et al., 2023). Dengan prinsip ini, motor BLDC dapat mencapai tingkat efisiensi tinggi, kecepatan variabel, dan umur pakai yang lebih panjang dibandingkan dengan motor DC konvensional yang menggunakan sikat dan komutator. Secara umum konstruksi utama motor BLDC terdiri dari stator, kumparan, rotor, poros, magnet permanen, dan *hall sensor*, yang dapat dilihat pada gambar II.8.



**Gambar II. 8 Prinsip Kerja Motor BLDC**

1. Rotor adalah bagian dari motor BLDC yang mengalami pergerakan atau rotasi. Rotor dibuat menggunakan bahan *ferromagnetic* padat atau lapisan plat dengan laminasi serupa dengan stator. Rotor ini terdiri dari magnet permanen dengan jumlah genap, yang disusun sedemikian rupa sehingga memiliki jumlah kutub selatan dan utara yang sama. Motor BLDC umumnya menggunakan dua hingga delapan pasang kutub magnet yang diatur secara berpasangan. Pemilihan jenis magnet permanen untuk konstruksi motor BLDC bergantung pada kebutuhan akan kerapatan medan magnet selama proses desain, yang dapat dilihat pada gambar II.9.



**Gambar II. 9 Rotor BLDC**

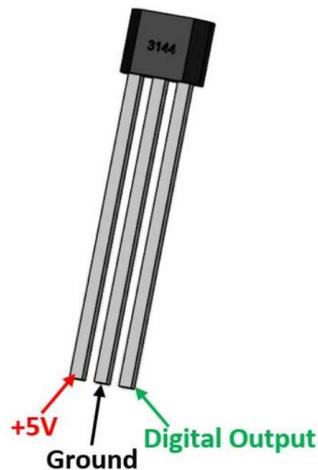
2. Stator merupakan komponen motor BLDC yang bersifat diam atau tidak mengalami gerakan. Stator umumnya terbuat dari bahan *ferromagnetic* yang disusun dari plat tipis yang kemudian dilaminasi dengan bahan isolator, berfungsi untuk mengurangi rugi arus pusar atau *eddy current*. Semakin tipis lapisan stator, maka rugi inti juga akan semakin kecil. Peran utama stator adalah sebagai tempat untuk melilitkan kumparan jangkar. Ketika diberikan arus, kumparan jangkar menghasilkan medan *elektromagnetik* yang menarik dan mendorong magnet permanen yang terletak pada rotor. Motor BLDC dikendalikan oleh inverter yang mengubah sumber arus searah dari baterai utama menjadi sumber tiga fasa. Oleh karena itu, stator biasanya terdiri dari slot yang jumlahnya merupakan kelipatan dari tiga. Kombinasi antara jumlah slot pada stator dan jumlah kutub magnet pada rotor akan menentukan besar *winding factor* yang mempengaruhi efisiensi akhir motor. sebagaimana terlihat pada Gambar II.10.



**Gambar II. 10 Stator BLDC**

3. Berbeda dengan motor DC yang mengandalkan sikat sebagai komutator, Motor BLDC menggunakan komutator berupa komponen elektronika. Kumparan jangkar

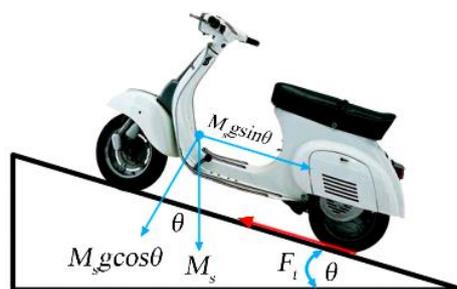
diberikan sinyal secara berurutan sesuai dengan suatu urutan untuk menggerakkan motor. Untuk menentukan urutan pemberian arus pada kumparan jangkar, inverter membutuhkan data posisi kutub magnet pada rotor secara terus-menerus. Untuk membaca posisi magnet pada rotor, digunakan *hall sensor* yang memiliki bentuk sebagaimana yang terlihat pada Gambar II.11.



*Gambar II. 11 Hall Sensor*

### 2.5 Perhitungan Kebutuhan Traksi Kendaraan

Penentuan kebutuhan gaya traksi pada kendaraan dapat dilakukan dengan menganalisis gaya dinamis yang bekerja pada kendaraan, seperti torsi/tenaga yang diperlukan oleh motor Listrik yang digunakan. Bisa dilihat pada gambar II.12



*Gambar II. 12 Traksi Force Kendaraan*

- **Hambatan Aerodinamis**

Hambatan aerodinamis ( $F_a$ ) adalah gaya yang melawan gerakan sepeda akibat hambatan fluida dari udara dan air. Dihitung menggunakan rumus:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A C_d (V_1 + V_2)^2 \quad (\text{II.1})$$

Keterangan:

- $\rho$  : Massa jenis udara [kg/m<sup>3</sup>]
- $A$  : Luas permukaan [m<sup>2</sup>]
- $C_d$  : Koefisien hambatan
- $V_1$  : Kecepatan sepeda [m/s]
- $V_2$  : Kecepatan angin [m/s]

- **Tahanan Gelinding**

Tahanan gelinding ( $F_r$ ) adalah gaya yang menahan gerakan sepeda pada permukaan. Dihitung sebagai:

$$F_r = \mu N = \mu (m \cdot g) \quad (\text{II.2})$$

Keterangan:

- $\mu$  : Koefisien tahanan gelinding
- $M$  : massa sepeda [kg]
- $N$  : Berat sepeda [N]
- $g$  : gaya gravitasi

- **Torsi**

Torsi (*torque*) adalah gaya yang digunakan untuk memindahkan suatu objek dengan arah dan jarak tertentu. Rumus torsi adalah:

$$\tau = F_{total} \times R_{roda} \quad (\text{II.3})$$

Keterangan:

- $F_{total}$ : Gaya total [N]
- $R_{roda}$ : Jari-jari roda sepeda [m]

- **Daya Mekanik & Listrik**

Hubungan antara torsi dan daya pada motor listrik dinyatakan sebagai:

$$P = \omega \cdot \tau \quad (\text{II.4})$$

Dengan,

$$\omega = \frac{2\pi \times n}{60} = \text{kecepatan sudut [rad/s]} \quad (\text{II.5})$$

P = daya [W]

Daya mekanik ( $P_m$ ) dapat dihitung sebagai:

$$P_m = m \cdot g \cdot \nabla \cdot \mu \quad (\text{II.6})$$

Keterangan:

- $P_m$  : daya mekanik [Watt]
- $m$  : massa [kg]
- $\nabla$  : kecepatan [m/s<sup>2</sup>]
- $\mu$  : Koefisien tahanan gelinding

Kecepatan translasi dapat ditentukan oleh:

$$n = \frac{P_{mekanik}}{P_{listrik}} \times 100\% \quad (\text{II.7})$$

Efisiensi motor Listrik:

n = efisiensi motor Listrik [%]

## 2.6 Perhitungan Kebutuhan Whellhub

Dalam penelitian ini, akan difokuskan pada perancangan motor BLDC 2kW dengan perbandingan *winding*. Perbandingan *winding* pada motor listrik dapat mempengaruhi kinerja dan karakteristik motor (Putranto Rifki Dwi, 2022). Jumlah *slot* per *pole* per fase umumnya di simbolikan sebagai 'q', ketika nilai q lebih besar atau sama dengan 1, maka *winding* motor disebut *distributed winding*. *Distributed winding* dapat dibagi menjadi integer (q= bilangan integer) dan *fractional* (q= bilangan *fractional*). Desain motor dengan *concentrated Windings* dimana  $q < 1$

akan selalu *fractional*, dan mereka mengikuti aturan yang sama sebagai *fractional slot winding* berikut.

$$q = \frac{N_s}{N_{ph} \cdot N_m} \quad (\text{II.8})$$

Dimana :

$N_s$  : Jumlah *Slot*       $N_{ph}$  : Jumlah fasa

$N_m$  : Jumlah *plot*

Pada kasus *fractional* q dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$q = \frac{z}{b} \quad (\text{II.9})$$

Dimana pembilang  $z$  adalah jumlah  $N_s/N_{ph}$  didalam  $N_m$  *pole* unit yang diekspresikan oleh  $b$ , dan  $z$  diperoleh dari:

$$z = \frac{N_s}{\text{gcd}(N_s, N_m \cdot N_{ph})} \quad (\text{II.10})$$

GCD adalah faktor persekutuan terbesar antara jumlah *slot* dan hasil dari jumlah *pole* dan jumlah fase.

- **Faktor Distribusi.**

Faktor distribusi, dimana  $n$  adalah *winding space harmonic order* dan  $\sigma$  adalah sebaran sudut fasa yang besarnya 600, faktor distribusi dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$K_{mn} = \frac{\sin\left(\frac{1}{2}n\sigma\right)}{z \sin\left(\frac{n\sigma}{2z}\right)} \quad (\text{II.11})$$

- **Faktor Coil Span**

Untuk menemukan faktor *coil span*. maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai sudut *pitch* dari *slot* atau  $\gamma_s$ .

$$Y_S = \frac{\pi \cdot N_m}{N_s} = \frac{\pi}{q \cdot N_{ph}} \quad (\text{II.12})$$

Dimana sudut *coil span*  $\epsilon$  adalah:

$$\varepsilon = \pi - Y_s \quad (\text{II.13})$$

Sehingga faktor *coil span* dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$K_{en} = \cos\left(\frac{1}{2}n\varepsilon\right) \quad (\text{II.14})$$

- **Faktor Winding**

Faktor *winding* secara sederhana dapat diekspresikan sebagai perkalian antara faktor distribusi dan faktor *coil span*.

$$K_{wn} = K_{mn} \cdot K_{en} \quad (\text{II.15})$$

- **Perhitungan winding**

Jumlah winding pada motor BLDC ditentukan berdasarkan kombinasi antara jumlah slot stator, jumlah fasa, dan jumlah kutub magnet.

$$q = \frac{N_s + 1}{\frac{m}{N_m}} \quad (\text{II.16})$$

$N_s$  = jumlah slot

$m$  = jumlah fasa

$N_m$  = jumlah kutub magnet

- **Perhitungan Diameter kawat**

Menentukan diameter kawat tembaga, rumus dasar mencari resistensi (R) dari kawat tembaga di berikan hukum resistensi material.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{II.17})$$

R = resistensi kawat ( )

P = revisivitas tembaga ( )

L = Panjang kawat (m)

Yang dimana luas penampang kawat (A) untuk kawat berbentuk lingkaran dihitung sebagai :

- **Perhitungan Nilai Arus**

Dalam perhitungan nilai arus membutuhkan parameter nilai tegangan, dan daya fasa, maka menggunakan persamaan.

$$I = \frac{P}{V \times \eta} \quad (\text{II.18})$$

P = daya motor

V = tegangan

I = arus

$\eta$  = efisiensi motor

- **Mengitung Jumlah Lilitan**

Diameter kawat di dapatkan pada , jumlah kawat yang akan dililit pada stator akan di hitung dengan menggunakan persamaan.

$$N_w = \frac{N_s}{N_{ph} \times p} \quad (\text{II.19})$$

N<sub>w</sub> = jumlah lilitan per fasa

N<sub>s</sub> = jumlah slot

m = jumlah fasa

p = jumlah pasang kutub

- **Pengaruh jumlah lilitan dengan torsi**

Torsi yang di dihasilkan oleh dinamo berhubungan dengan konstanta torsi dan arus yang mengalir pada lilitan.

$$T = K_t \times I \quad (\text{II.20})$$

T = torsi (Nm)

K<sub>t</sub> = konstanta torsi (Nm/A)

I = arus yang mengalir pada lilitan (A)

Dimana konstanta torsi

$$K_t = \frac{N \times \Phi}{2 \times \pi} \quad (\text{II.21})$$

N = jumlah lilitan

$\Phi$  = Fluks magnetic (weber)

- **Pengaruh jumlah lilitan dengan RPM**

Kecepatan putar dinamo di pengaruhi oleh kosntanta kecepatan (), yang memiliki hubungan terbalik dengan konstanta torsi ()

$$N = \frac{V \times 60}{K_e} \quad (\text{II.22})$$

V = tegangan

Ke = konstanta tegangan balik (v/rad/s)

- **Losses pada Motor BLDC**

Seperti yang kita ketahui, tidak ada mesin DC yang memiliki efisiensi seratus persen. Mesin DC memiliki beberapa inefisiensi yang dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *Electrical Losses* dan *Mechanical Losses*.

- **Electrical Losses:**

*Copper Losses:* Merupakan kerugian yang timbul akibat panas yang dihasilkan oleh kawat tembaga yang membentuk kumparan pada mesin DC. Panas ini muncul karena adanya arus terinduksi yang mengalir melalui kawat dan resistansi kawat. Besarnya kerugian ini sebanding dengan  $i^2R$ .

*Eddy Current Losses:* Merupakan arus induksi yang muncul pada konduktor akibat perubahan medan *magnetik* yang dirasakan oleh konduktor tersebut. Pada motor DC, kerugian ini terjadi pada inti atau kumparan motor, mengakibatkan penurunan arus yang mengalir melalui kumparan dan gaya *Lorentz* yang berkurang.

*Hysteresis Losses:* Terjadi saat rotor motor DC mengalami perubahan arah arus pada kumparan, memerlukan daya tambahan untuk mengubah arah arus secara sempurna. Daya tambahan ini dikenal sebagai *Hysteresis Loss*.

- **Mechanical Losses:**

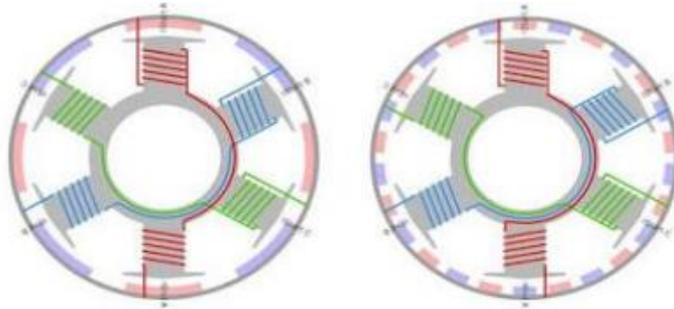
*Frictional Losses:* Merupakan inefisiensi yang disebabkan oleh gaya gesekan yang bekerja pada struktur bergerak dalam mesin DC. Banyak bagian motor DC, seperti *bearing dan brush*, memiliki potensi untuk mengalami gesekan.

*Windage Losses:* Merupakan kerugian yang timbul akibat gesekan atau tahanan udara yang dialami oleh bagian bergerak mesin DC.

### 2.5.1 Jumlah *slot* dan *pole* berdasarkan *winding factor* dalam fungsi $q$

- Abaikan *winding factor* Dimana  $q < 0.25$ .

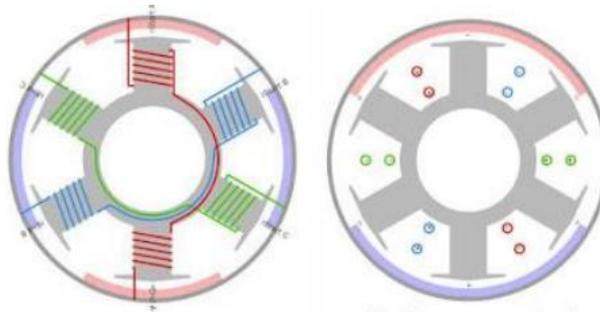
Jika nilai  $q$  kurang dari 0.25 maka keliling lingkaran yang ditutupi oleh rotor pole kurang dari setengah gigi stator, sehingga terjadi interaksi yang banyak antara kutub-kutub magnet dengan gigi stator, hal ini akan mengurangi torsi yang bisa dihasilkan oleh motor.



**Gambar II. 13** Konfigurasi jumlah *slot* dan *pole*  $q < 0.25$

- Abaikan *winding factor* Dimana  $q > 0.5$

Jika  $q$  lebih besar dari 0.5 maka tipe *concentrated winding* tidak lagi efektif, maka konfigurasi *distribute winding* digunakan.



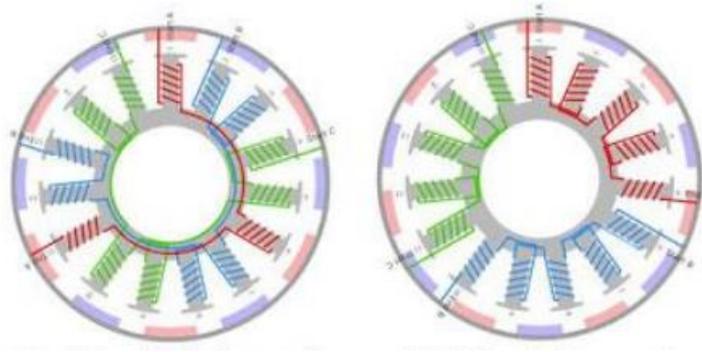
**Gambar II. 14** Konfigurasi jumlah *slot* dan *pole* dengan  $q > 0.5$  atau  $q = 1$

- Abaikan *winding factor* dimana  $N_s = N_m$

Jika jumlah *slot* sama dengan jumlah *pole* maka motor akan menghasilkan *cogging torque* yang besar dan tidak lagi *self starting*.

- Abaikan *winding factor* apabila konfigurasi *winding* tidak seimbang dan simetris.

Motor yang memiliki *winding* yang seimbang akan memiliki jumlah *coil* yang sama per fasa per pengulangan segmen kutub *pole*. Motor yang tidak memiliki *winding* yang seimbang akan menghasilkan torsi hanya pada satu sisi rotor.



**Gambar II. 15** Konfigurasi jumlah *Slot* dan *Pole Unbalance* dan *balance rotor*