

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Mobil Listrik

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi lainnya (Wikipedia.org). Energi listrik dapat diperoleh dari media jala-jala PLN ataupun media lainnya dalam hal ini adalah dengan cara memanfaatkan panas matahari yang kemudian akan dikonversi menjadi energi listrik. Di era globalisasi seperti ini tentunya sangat efektif sebab dapat mengurangi polusi udara yang bisa mengganggu sistem pernapasan manusia serta mengurangi penggunaan BBM sehingga ketergantungan untuk mengimpor minyak dari luar negeri pun berkurang, (Egziabher and Edwards, 2013).

2.1.1 Sejarah Mobil Listrik

Dimulai pada tahun 1896 untuk mengatasi masalah pengisian baterai yang kurang optimal pada truk listrik, pemilik kendaraan membeli kendaraannya dari General Electric Company (GEC) tanpa baterai dan membeli baterainya di Hartford Electric yang merupakan perusahaan jasa untuk mengganti baterai. Pemilik kendaraan akan dikenai biaya servis bulanan dan biaya perjalanan per milnya untuk biaya perawatan truknya. Jasa pelayanan ini tersedia pada tahun 1910 sampai 1924 dan menempuh total jarak sekitar 6 juta mil. Sebelumnya pada tahun 1897, mobil listrik mulai dipakai sebagai kendaraan komersial di Amerika Serikat sebagai armada taksi listrik New York City, taksi ini dibuat oleh Electric Carriage and Wagon Company Philadelphia. Setelah itu pada tahun 1904, Jerman berhasil menciptakan mobil listrik pertamanya, dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Mobil Listrik di Jerman pada 1904

Sumber: (Egziabher and Edwards, 2013)

2.1.2 Perkembangan Mobil Listrik

Krisis energi pada tahun 1970-an dan 1980-an menimbulkan kembalinya minat masyarakat akan mobil listrik. Pada awal 1990-an, California Air Resources Board (CARB) mulai menekan para pabrikan otomotif untuk mulai membuat mobil yang efisien dalam bahan bakar, rendah emisi, dengan tujuan akhirnya adalah membuat kendaraan emisi nol seperti kendaraan listrik. Sebagai respon, beberapa pabrikan mencoba membuat mobil listrik mereka masing-masing, seperti Chrysler TEVan, truk Pick Up Ford Ranger EV, GM EV1, pikap S10 EV, Hatchback Honda EV Plus, Miniwagon Altra EV, dan Toyota RAV4 EV. Resesi ekonomi global pada akhir tahun 2000-an membuat banyak produsen otomotif dunia meninggalkan mobil-mobil SUV yang besar dan boros, dan beralih ke mobil-mobil kecil, hibrida, dan mobil listrik. Perusahaan otomotif asal California, Tesla Motors, memulai pengembangan Tesla Roadster pada tahun 2004, dan kemudian diluncurkan ke publik pada tahun 2008.

Sampai pada awal tahun 2012, jumlah kendaraan listrik yang diproduksi massal yang tersedia di dunia masih terbatas. Kebanyakan mobil listrik yang tersedia saat ini adalah kendaraan listrik jarak dekat. Indonesia tidak ketinggalan mengambil bagian dalam memproduksi mobil listrik. Walaupun masih berupa purwarupa, mobil listrik buatan anak bangsa cukup menjanjikan. Saat ini telah ada 2 Kecepatan yang diketahui, yaitu Mobil listrik Ahmadi dan Tucuxi. Pada tanggal 20 Mei 2013 dilakukan diuji coba bus listrik untuk APEC 2013 Oktober. Sampai sekarang bus listrik tersebut melayani transportasi publik di Yogya. Tanggal 6 Mei 2014 ITS menorehkan rekor mobil listrik untuk dalam negeri dengan rincian jarak tempuh total 800 km, kecepatan rata-rata 120-130 km/jam serta setiap 8 jam dilakukan pengisian ulang selama 3 jam. Rute yang ditempuh adalah Jakarta – Bandung – Tasikmalaya – Purwokerto – Jogjakarta – Madiun – Surabaya.

2.2 Baterai

Baterai adalah sebuah sel elektrokimia yang berperan penting dalam penyimpanan dan konversi energi melalui prinsip elektrokimia. Ada dua jenis sel elektrokimia berdasarkan cara kerjanya: sel galvanis yang mengubah energi kimia menjadi kerja listrik, dan sel elektrolisis yang menggunakan kerja listrik untuk memicu reaksi kimia yang tidak spontan. Baterai konvensional mengandung komponen kimia dalam perangkat itu sendiri, sedangkan sel bahan bakar (fuel cell) mengharuskan reaktan dari luar. Baterai terdiri dari dua elektroda berbeda yang dicelupkan dalam elektrolit yang dapat menghantarkan listrik. Salah satu elektroda memiliki muatan positif, sementara yang lainnya negatif. Ujung elektroda yang menonjol di atas elektrolit disebut terminal positif dan terminal negatif. Ketika

kedua terminal terhubung dengan kawat konduktor, arus listrik mengalir dari terminal negatif ke terminal positif.

Perbedaan potensial atau tegangan listrik antara kedua terminal tergantung pada jenis bahan elektroda dan elektrolit, dan ini diukur dalam volt. Baterai dapat dibagi menjadi dua jenis: baterai primer yang tidak dapat diisi ulang dan baterai sekunder yang dapat diisi ulang. Mobil yang menggunakan baterai Li-ion memiliki dampak polusi yang rendah, (Fitriyah et al., 2020). Dalam hal dampak lingkungan keseluruhan yang disebabkan oleh baterai (dengan skor indikator ramah lingkungan sebesar 99 poin), hanya berkontribusi sebesar 15%. Dampak yang dihasilkan dari ekstraksi Lithium untuk komponen baterai Li-ion kurang dari 2,3% (dengan skor indikator ramah lingkungan sebesar 9 poin). Beban lingkungan utama yang diakibatkan oleh baterai adalah dalam hal pasokan tembaga dan aluminium yang digunakan dalam produksi anode dan katode, serta kabel atau sistem manajemen baterai yang diperlukan. Keunggulan dari baterai Li-ion meliputi bobot yang ringan, pengisian yang lebih cepat, meskipun harganya cenderung lebih mahal daripada aki. Pada gambar Gambar 2.2 adalah baterai yang digunakan pada mobil listrik Rakisa.



Gambar 2. 2 Baterai Li-ion 48 Volt

Sumber: (Baterai et al., 2016)

Terdapat 2 jenis baterai berdasarkan pada proses yang terjadi, yaitu:

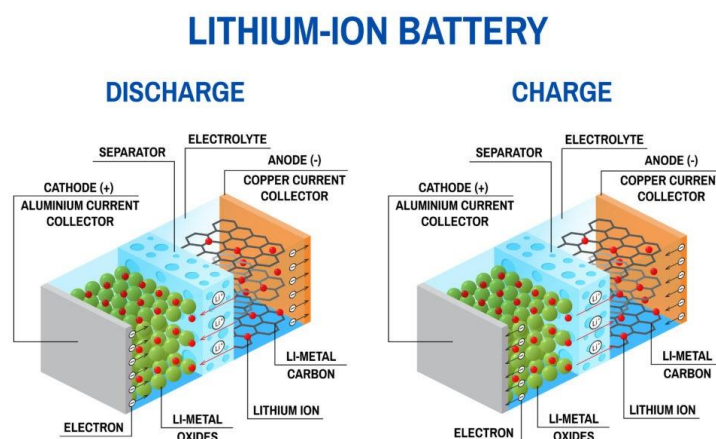
1. Primary Battery

Baterai yang hanya bisa digunakan sekali dan dibuang. Bahan elektroda tidak dapat dibalik saat dilepas.

2. Secondary battery

Baterai yang dapat diisi ulang. Pada prinsipnya, metode pembangkitan daya baterai sekunder sama dengan baterai primer. Namun reaksi kimia pada baterai sekunder ini bersifat reversible (dapat dibalik). Baterai lithium ion adalah baterai sekunder atau baterai isi ulang. Dibandingkan dengan jenis baterai sebelumnya, baterai ini memiliki banyak keunggulan, termasuk umur panjang (500-1000 siklus), efek memori kecil, tegangan kerja tinggi (3.6 V), dan kapasitas spesifik yang lebih tinggi daripada baterai sekunder lainnya.

Dalam kondisi charge dan discharge, baterai lithium ion bekerja sesuai dengan proses interkalasi, yang melepaskan ion lithium dari posisi dalam struktur kristal satu bahan elektroda dan memasukkan ion lithium ke posisi dalam struktur kristal bahan elektroda lain. Ada elektroda negatif di dalam baterai sekunder terkait dengan reaksi oksidasi setengah sel yang melepaskan elektron masuk ke sirkuit eksternal, dan elektroda yang positif terjadi reaksi setengah sel, reaksi reduksi yang menerima elektron dari sirkuit katoda mengalami reaksi kimia reduksi. Proses interkalasi baterai lithium ion saat charge dan discharge dapat dilihat pada Gambar 2.3.



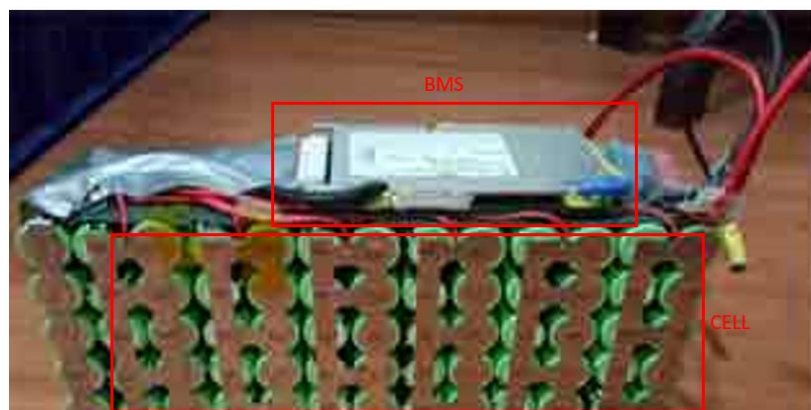
Gambar 2. 3 Prinsip kerja baterai lithium ion
Sumber: (Suwito dkk., 2017)

Kemampuan kapasitas energi yang tersimpan dalam baterai lithium tergantung pada beberapa banyak ion lithium yang dapat disimpan dalam struktur bahan elektrodanya dan berapa banyak yang dapat digerakkan dalam proses charging dan discharging, karena jumlah arus elektron yang tersimpan dan tersalurkan sebanding dengan jumlah ion lithium yang bergerak, (Saputry dkk., 2019). Pada saat charging, bahan elektroda positif akan terionisasi dan menghasilkan ion lithium yang bermuatan positif dan bergerak ke dalam elektrolit untuk mencapai bahan elektroda negatif, sedangkan elektron yang dilepaskan bergerak ke elektroda negatif (anoda) melalui rangkaian eksternal. Ion litium ini akan masuk ke bahan elektroda negatif melalui mekanisme interkalasi, yaitu struktur kristal bahan elektroda positif dan bahan elektroda negatif tidak akan berubah. Dan pada saat discharging, akan terjadi aliran ion dan elektron yang berlawanan arah dengan proses charging. Baterai yang digunakan pada penelitian ini menggunakan spesifikasi pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Baterai Li-ion

Spesifikasi Baterai Li-ion

Nominal Voltage	48V
Charge Max Voltage	54.6V
Nominal Capacity	12 Ah (2016 Wh)
Charging Max Current	1-12A max
Max Discharge Rated	60A
Max Discharge Continues Current	60A BMS
Over Discharge protection voltage	+/- 37V



Gambar 2. 4 Struktur Penunjang Baterai

Gambar 2.4 menjelaskan bahwa baterai terdiri dari beberapa cell yang disusun secara seri dan parallel, dan baterai manajemen *system* (BMS). Baterai dilapisi oleh plastic waterproof berwarna biru untuk melindungi komponen baterai dari air dan udara yang menyebabkan korosif.

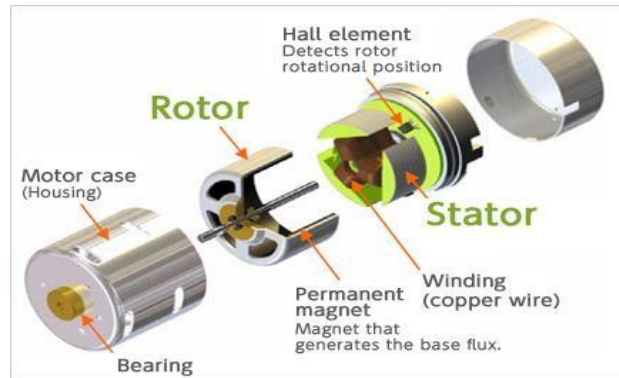
2.3 Motor Listrik BLDC

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab mobil listrik diatas bahwa mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik maka dipilihlah motor listrik jenis BLDC, motor DC tanpa sikat, yang mempunyai torsi yang besar dan untuk mengaktifkannya tidak membutuhkan sumber listrik yang besar. Selain itu motor ini dipilih karena efisiensi yang tinggi, suaranya halus, ukuran kompak, keandalan yang tinggi dan perawatan yang rendah.

2.3.1 Pengertian Motor BLDC

BLDC Motor (Brush Less Direct Current Motor) adalah suatu jenis motor sinkron, artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar di frekuensi yang sama. BLDC motor tidak mengalami slip, tidak seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai permanen magnet pada bagian rotor sedangkan elektro-magnet pada bagian statornya. Dalam hal ini, motor BLDC setara dengan motor DC dengan komutator terbalik, di mana magnet berputar sedangkan konduktor tetap diam. Dalam komutator motor DC, polaritas ini diubah oleh komutator dan sikat. Namun, dalam Brushless motor DC, pembalikan polaritas dilakukan oleh transistor Switching untuk mensinkronkan dengan posisi rotor. Oleh karena itu, BLDC motor sering menggabungkan baik posisi sensor internal atau eksternal untuk merasakan posisi rotor yang sebenarnya, atau posisi dapat dideteksi tanpa sensor, (Leonard N. Elevich, 2005).

2.3.2 Konstruksi BLDC Motor



Gambar 2. 5 Kontruksi Motor BLDC

Sumber: (Leonard N. Elevation, 2005).

Seperti pada gambar 2.5 motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor (bagian berputar) dan stator (bagian stasioner). Bagian penting lainnya dari motor adalah gulungan stator dan magnet rotor.



Gambar 2. 6 Struktur Komponen Motor BLDC

Pada Gambar 2.6 beberapa struktur komponen motor BLDC antara lain Magnetic Pole, Stator Winding Coil, Rotor, Stator, dan Bearing.

2.3.3 Rotor

Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC Brushless bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara Brushes (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam “Epoxy” dan tidak ada Brushes-nya. Rotor dibuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub magnet utara (N) atau selatan (S). Material magnetis yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus pula. Biasanya magnet ferrit yang dipakai untuk membuat magnet tetap, tetapi material ini mempunyai kekurangan yaitu Flux Density yang rendah untuk ukuran volume material yang diperlukan untuk membentuk rotor, (Randy 2016).

2.3.4 Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam/statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC Brushless statornya terdiri dari 12 belitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC Brushless terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen, (Antonious, 2020).

2.3.5 Spesifikasi Motor BLDC



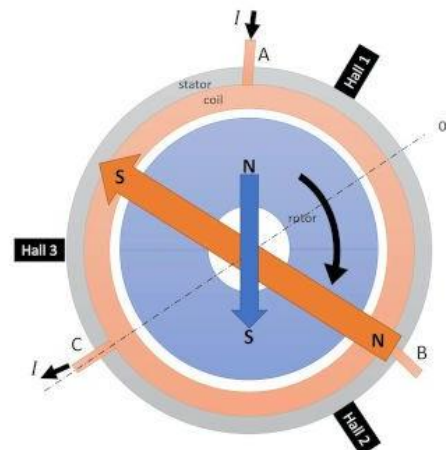
Gambar 2. 7 BLDC Motor 2000 W

Pada gambar 2.7 menunjukkan bahwa menggunakan BLDC QS Motor 2000 Watt dan Spesifikasi BLDC mobil listrik yang digunakan 48 Volt V3 10 Inch 2000W 205 45H V3 brushless electric scooter motorcycle hub motor sesuai pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi BLDC Motor 2000 W

BLDC Motor Specification	
Motor Type	BLDC Outer Rotor In-Wheel Hub Motor With Hall Sensor
Brand	QS Motor
Motor Design	Double axle with 10inch moped rim (integrated)
Rim size	10x2.15inch(Narrow Tire as <i>Default</i>), Matched tire:3.0-10,3.5-10 10x3.0inch(Wide Tire)
Magnet Height	55mm, 16 pole pairs
Stator	Aluminum Core
Rated Power	2000W
Speed	910 rpm
Max Torque approx.	174N.m
KV	19.5
Max Efficiency approx	91%
Brake type	Disc brake (as <i>Default</i>), PCD 3x80mm-M8, CB 58mm
Drop-outs	200mm
Waterproof Grade	IP54

2.3.6 PWM dalam Motor BLDC



Gambar 2. 8 *PWM Motor BLDC*

Sumber: (Irawan and Ss, 2020)

Gambar 2.8 bahwa menjelaskan Generator PWM beralih di antara dua keadaan tersebut berdasarkan siklus tugasnya, dan sebagai hasilnya di sini kita melihat bagaimana fase-A dan fase- Tegangan C berdenyut hidup dan mati antara +/- 250 Volt yang merupakan +/- tegangan sumber DC/2. Ketika tegangan fasa dimodulasi seperti ini, tegangan efektif yang terlihat oleh motor akan diratakan. Singkatnya, kami membahas konsep PWM dan bagaimana PWM digunakan untuk mengendalikan motor BLDC pada kecepatan yang bervariasi karakteristik voltase dan kecepatan selama kontrol PWM. PWM memiliki banyak keunggulan dan merupakan solusi yang paling banyak digunakan untuk driver BLDC dengan Mengatur voltase PWM yang memadai dan menggunakan frekuensi PWM yang tinggi akan membantu mengurangi riak dan dapat menghindari penggunaan induktansi tambahan.

2.3.7 Cara Kerja Motor BLDC

Motor BLDC dapat beroperasi saat statornya menerima arus tiga fase. Kumparan-kumparan pada stator menerima arus AC fasa, yang mengakibatkan

perubahan kontinu dalam medan magnet dan polaritasnya, (Abdurrahman As-Salaf And Syahrial, 2021). Sebelum menjelaskan secara terperinci skema cara kerja motor BLDC ini, perhatikan tabel perubahan komutasi motor BLDC berdasarkan nilai sensor hall yang ditunjukkan pada Tabel 2.3

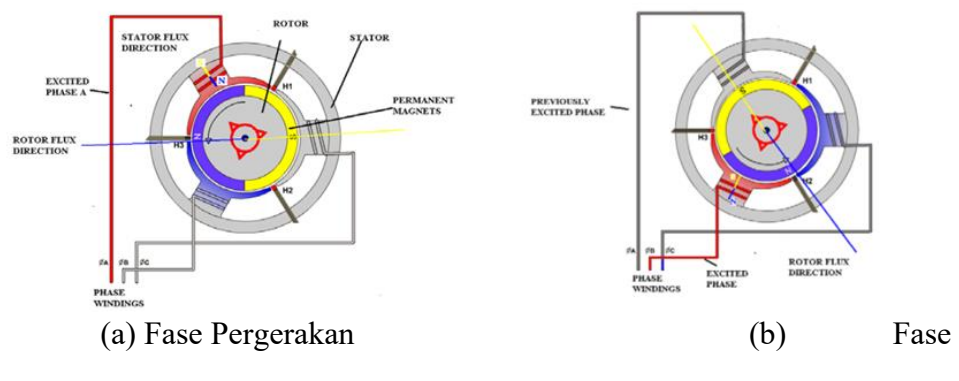
Tabel 2. 3 Komutasi Motor BLDC

Hall Sensor Value	Phase	Switch
101	U-V	Q1; Q4
001	U-W	Q1; Q6
011	V-W	Q3; Q6
010	V-U	Q3; Q2
110	W-U	Q5; Q2
100	W-V	Q5; Q4

Pada dasarnya, medan magnet memiliki sifat di mana kutub yang sama akan saling tolak, sedangkan kutub yang berlawanan akan saling tarik. Dalam konteks motor BLDC, prinsip ini diterapkan dengan menggunakan dua jenis magnet, yaitu magnet permanen pada rotor dan elektromagnet pada kumparan stator yang dihasilkan melalui arus listrik. Motor BLDC mengontrol pergerakan rotor dengan mengatur arus yang mengalir ke kumparan stator, menciptakan medan elektromagnet yang sesuai. Ini berbeda dari motor DC konvensional yang menggunakan komutasi mekanis. Rotor pada motor BLDC dilengkapi dengan magnet permanen, sementara kumparan stator dengan tiga fase ditempatkan di

sekitarnya. Pergerakan rotor dalam motor BLDC dikendalikan dengan mengaktifkan fase kumparan secara bergantian sesuai dengan pergerakan rotor. Ketika satu fase diaktifkan, medan elektromagnet yang dihasilkan oleh fase tersebut berinteraksi dengan magnet permanen pada rotor, menyebabkan rotor bergerak.

Proses rotasi berdasarkan medan magnet ini dijelaskan dengan ilustrasi pada Gambar 2.9(a), dan perubahan fase yang diaktifkan dijelaskan pada Gambar 2.9(b). Gambar 2.9(a) menunjukkan contoh di mana fase A diaktifkan, yang menciptakan fluks stator, dan fluks rotor dihasilkan oleh magnet permanen. Dengan demikian, motor BLDC menggabungkan prinsip dasar medan magnet yang saling tarik dan tolak dengan pengendalian arus pada kumparan stator untuk menghasilkan gerakan rotasi yang diinginkan pada rotor, (Irawan and Perdana SS, 2020).



Eksitasi

Gambar 2. 9 Fase Pergerakan dan Eksitasi BLDC

Sumber: (Nurmalia, Hadi and Cahyadi, 2021)

Motor BLDC 2KW digunakan karena memiliki ukuran daya cukup tinggi sebesar 2000 Watt ukuran daya yang cukup besar, yang cocok untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan motor dengan tenaga tinggi dan sangat cocok untuk ajang balap mobil KMLI. Motor ini tidak menggunakan sikat untuk mengubah arah aliran listrik, yang membuatnya lebih tahan lama dan memerlukan perawatan yang

lebih sedikit dibandingkan dengan motor dengan sikat. Selain itu dalam ajang balap KMLI dibutuhkan pengaturan motor yang yang dapat dikendalikan dengan mudah. Motor BLDC dapat dikendalikan dengan relatif mudah menggunakan kontroler Votol EM-150, (Amrullah, Perkasa and Fakhruddin, 2023).

2.4 Rumus Torsi Motor BLDC

Pada perhitungan torsi dimana diambil daya maksimum mobil dari Owner's Manual Book.

$$Torsi (Nm) = \frac{Px60}{2\pi xN} \dots\dots\dots (2. 1)$$

Keterangan:

- Torsi : torsi yang dihasilkan oleh motor BLDC dalam Newton-meter (Nm)
- N : RPM yang Anda ingin konversi ke torsi
- 2π : 2π adalah konstanta untuk perhitungan rotasi penuh (360 derajat atau 2π radian).
- P : P adalah daya (dalam watt, W).
- 60 : 60 digunakan untuk mengubah satuan menit menjadi detik.

2.5 Kontroller dan Inverter

2.5.1 Pengertian Kontroller Votol EM-150



Gambar 2. 10 Votol Controller EM-150 serie number 72470

Sumber: (Antonius, 2020).

Pada Gambar 2.10 merupakan *controller* Votol EM-150 yang digunakan mobil listrik Rakisa. *Controller* dan Inverter (perubah tegangan DC menjadi AC) *Controller* pada motor DC brushless berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor DC brushless karena motor DC brushless membutuhkan suatu trigger pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor DC brushless untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat. Inverter pada motor DC brushless berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk *controller* menjadi tegangan AC karena jenis motor DC brushless biasanya memiliki multipole tiga phase maka dibutuhkan inverter tiga phase tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar.

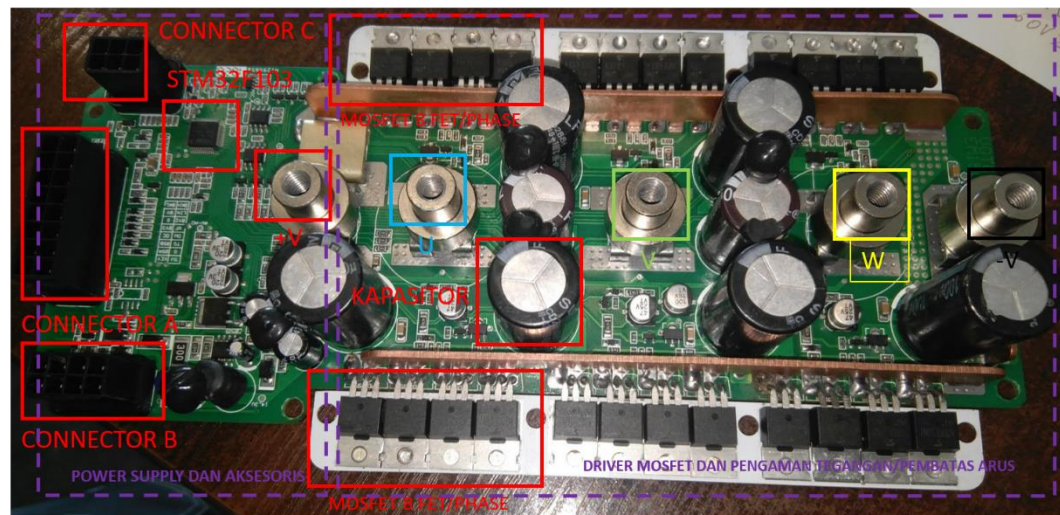
Berdasarkan kemampuan *control power supply*, kita dapat memilih dengan tepat rating tegangan untuk motor yang dibutuhkan. Untuk tegangan 48 volt atau kurang dari itu, biasanya digunakan untuk bidang otomotif, robotic atau penggerak lengan mekanik kecil. Untuk rating tegangan 100 volt atau lebih digunakan dalam bidang otomasi industri dan penggerak alat-alat industri. Berikut detail spesifikasi *controller* motor BLDC menggunakan Votol *Controller* series EM 150 sesuai Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Votol Controller EM-150

Votol Controller EM-150SERIE NUMBER 72470	
Voltage	48V-72V (max. 90V).
Battery Current	150A (peak).
Boost Current	200A
Phase Current	470A (peak)
Max Power	14400 Watt

Size	245 x 129 x 69mm
Warna unit	Grey / Abu Abu.

2.5.2 Struktur Komponen Kontroller Votol EM-150



Gambar 2. 11 Struktur Komponen Votol Em 150

Sumber: (Antonius, 2020).

Pada gambar 2.10 menjelaskan bahwa Komponen pokok pada kontroller adalah bagian microprosesornya. Pada mikro ini sudah terdapat program bagaimana mendriver mosfet sesuai urutannya, memberikan eksekusi PWM sesuai input masukan trotle, dan juga memiliki fitur-lain seperti brake/ rem, reverse, selft study, speed controll, communication port, led indikator, dll. Otak pengendali ini adalah “Central Processing Unit”, dan pengendali ini menggunakan STM32F103 dari ST-Microelectronics, yang merupakan CPU bermerek. CPU ini cukup kuat untuk menangani “Field Oriented Control” / FOC, tetap pengendali ini tidak menggunakan FOC, tampaknya karena itu akan memerlukan perangkat keras yang ditingkatkan, termasuk shunt individual pada masing-masing kabel tiga fase. . Jumlah ampere yang dapat

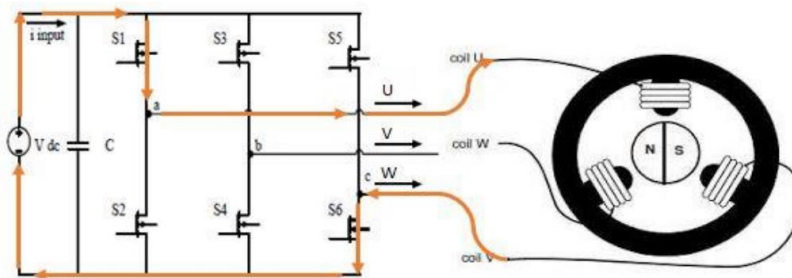
dialirkan oleh pengontrol sangat bergantung pada ukuran MOSFET, dan kuantitas MOSFET. Pengontrol ini menggunakan format TO-220, dan memiliki 24 FET, sehingga menggunakan 8 FET per fase Votol menilai pengontrol ini memiliki arus baterai 150A, dan arus fasa 470A, yang berarti 58A per FET. Pada skema diatas input PWM diberikan pada negatif channel sehingga hanya positif channel saja yang distabilkan dengan kapasitor 50V 47uF.

2.5.3 Cara Kerja Kontroller Votol EM-150

Prinsip kerja driver atau kontroler motor BLDC (Brushless Direct Current) adalah mengatur arus yang mengalir ke kumparan-kumparan stator motor untuk mengendalikan perputaran rotor. Driver atau kontroler bertanggung jawab untuk mengubah arus DC yang diterima dari sumber daya eksternal menjadi arus AC tiga fasa yang sesuai dengan posisi rotor saat ini. Driver motor berfungsi utama sebagai pengatur akselerasi, kecepatan maksimum dan perlambatan bagi putaran motor. Driver mampu mengatur motor hingga 14400 Watt, sehingga sangat mencukupi untuk motor yang digunakan pada lomba KMLI. Driver juga memiliki syarat proteksi terhadap percikan air, sehingga adanya proteksi IP67 sangat sesuai dengan kebutuhan mobil yang dioperasikan untuk ajang balap. Driver motor BLDC mengontrol motor Brushless Direct Current (BLDC) dengan mengatur arus yang mengalir ke kumparan stator, memanfaatkan sensor posisi rotor untuk menentukan urutan pengaktifan fase stator. Hal ini memungkinkan motor BLDC berputar tanpa sikat dan menghasilkan gerakan rotasi yang diinginkan. Driver juga memantau arus dan kecepatan motor, memberikan perlindungan, dan dapat memiliki kemampuan komunikasi eksternal, (Samsul, Dermawan and Chamdareno, 2022)

2.5.4 Cara Kerja Inverter dalam Kontroller Votol EM-150

Inverter dalam pengendali Votol EM150 untuk motor BLDC berfungsi mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC yang mengatur kecepatan dan arah putaran motor. Ini dilakukan melalui penggunaan modulasi lebar pulsa (PWM) untuk mengontrol durasi pulsa-pulsa listrik yang disesuaikan dengan perintah dari sistem pengendalian. Cara kerja inverter dilakukan dengan membangkitkan daya ke motor BLDC dengan skema pensaklaran. Agar motor BLDC dapat berputar dilakukan 6 kondisi pensaklaran. Proses Pensaklaran sebagai berikut.



Gambar 2. 12 Skema pensaklaran Kontroller Votol EM-150

Sumber: (Irawan and Perdana SS, 2020)

Gambar 2.12 menjelaskan Ketika hall sensor menunjukkan nilai 100, maka S1 dan S6 akan diaktifkan. Ini menghasilkan arus positif yang mengalir melalui S1 ke koil U, dan keluar dari koil W melalui S6 ke arah arus negatif. Akibatnya, motor akan berputar sejauh 60 derajat searah dengan arah jarum jam, (Irawan and Perdana SS, 2020).

2.5.5 Pengujian *Duty cycle* Votol EM-150

Pengujian duty cycle dari 0% hingga 100% pada pengendali votol adalah metode untuk menguji respons motor listrik terhadap berbagai tingkat daya yang

diatur oleh perubahan duty cycle. Dalam pengujian ini duty cycle dari 0% (tidak ada daya) hingga 100% (daya maksimal) dan mengamati bagaimana respons motor terhadap perubahan tersebut. Duty cycle dalam hal ini mengacu pada persentase waktu di mana pulsa daya diberikan dalam satu siklus kerja. Misalnya, jika mobil listrik memiliki pengendali voltase yang mengirimkan pulsa daya ke motor dengan duty cycle 50%, artinya pulsa daya diberikan selama setengah dari satu siklus kerja, dan sisa setengah siklus adalah waktu tanpa pulsa daya.

Dengan mengubah duty cycle, pengendali dapat mengatur berapa banyak daya yang disampaikan ke motor. Duty cycle yang lebih tinggi akan menghasilkan lebih banyak daya rata-rata ke motor, yang dapat meningkatkan kecepatan. Sebaliknya, duty cycle yang lebih rendah akan mengurangi daya rata-rata ke motor, yang dapat mengurangi kecepatan. Jadi, dalam mobil listrik dengan pengendali voltase, duty cycle digunakan untuk mengontrol seberapa lama daya disampaikan ke motor dalam setiap siklus kerja, yang pada gilirannya mempengaruhi kecepatan dan kinerja kendaraan, (Akbar and Riyadi, 2019). Untuk pengujian duty cycle tidak bisa dimonitoring secara langsung di software votol melainkan harus diuji dengan alat eksternal berupa osiloskop namun Pengujian duty cycle bisa didapatkan dengan pendekatan PWM.

Pengaturan kecepatan pada motor brushless dc dijalankan dalam kondisi motoring dengan sinyal PWM yang duty cycle diatur secara variabel menggunakan potensio sehingga kecepatan motor bldc dapat berubah ubah sesuai sinyal PWM tersebut. Dalam hal ini pengaturan potensio pada kontroler Votol EM-150 dapat dilakukan dengan pengujian arus keluaran kontroler dan arus keluaran motor. Dalam hal ini arus keluaran ditentukan oleh busbar current dan phase current. Dalam konteks

pengendalian motor listrik, istilah busbar current mengacu pada arus listrik yang mengalir dari baterai melalui busbar yang terhubung ke sistem pengendalian motor Votol EM-150. Dalam hal ini standar yang digunakan adalah 150 A. Semakin besar nilai busbar current maka kecepatan (RPM) dan torsi motor akan semakin besar, namun busbar current yang terlalu besar akan membuat controller Votol mudah rusak, overheating dan terbakar.

Selain phase current, Dalam hal ini phase current merujuk pada "phase current" (arus fasa) merujuk pada arus listrik yang mengalir melalui setiap fasa motor. Istilah ini khususnya berlaku untuk motor tiga fasa, seperti motor induksi tiga fasa atau motor BLDC (Brushless DC) tiga fasa. Pengaturan besar phase current akan berpengaruh pada torsi motor BLDC. Semakin besar nilai phase current maka torsi atau tenaga motor BLDC akan semakin besar. Namun terlalu besar nilai phase current akan menyebabkan motor panas dan terbakar. Menurut spesifikasi kontroler untuk pengendali Votol EM-150 nilai standar phase current yang digunakan adalah 9.000 A. Dalam hal ini nilai phase current bisa dijadikan acuan nilai duty cycle maksimal yaitu 100% dengan nilai phase current 9.000 A. Data ini akan dijadikan bahan dalam pengujian torsi dengan berbagai variasi nilai duty cycle.

2.5.6 Pengaruh *Duty Cycle* ,Arus, Kecepatan, Torsi, dan *Thermal*.

Duty cycle adalah ukuran yang digunakan untuk menggambarkan seberapa lama suatu sinyal elektrik aktif atau berada dalam keadaan "on" selama satu periode siklus kerja. Ini mengacu pada perbandingan antara waktu sinyal aktif (on) dengan

waktu total siklus kerja (on dan off)dalam persentase. Duty cycle biasanya digunakan untuk menggambarkan karakteristik sinyal berulang seperti gelombang persegi (square wave), pulse, atau sinyal PWM (Pulse Width Modulation). Ketika duty cycle meningkat, artinya motor menerima daya yang lebih lama dalam setiap siklus kerja. Ini dapat mengakibatkan arus yang lebih tinggi mengalir ke motor, tergantung pada karakteristik resistansi dan impedansi dalam sistem.

Arus yang lebih tinggi umumnya terjadi pada duty cycle yang lebih tinggi. Dampak duty cycle yang lebih tinggi cenderung memberikan lebih banyak daya rata-rata ke motor, yang dapat menghasilkan percepatan dan peningkatan kecepatan. Selain itu, Torsi motor umumnya berkaitan langsung dengan daya yang diberikan. Pada duty cycle yang lebih tinggi, motor menghasilkan torsi yang lebih tinggi, terutama pada kecepatan rendah hingga menengah. Duty cycle yang lebih tinggi juga cenderung menghasilkan lebih banyak daya yang dikonversi menjadi panas. Ini dapat menyebabkan peningkatan suhu pada motor dan komponen lainnya. Suhu yang lebih tinggi dapat memengaruhi efisiensi dan umur pakai komponen, (Akbar and Riyadi, 2019).

2.6 Perhitungan Konversi Kecepatan dan Daya Masuk

Perhitungan kecepatan dihitung menggunakan data-data yang sudah diambil pada pengujian sebelumnya yaitu jari jari roda dan rpm . Serta untuk mengetahui

nilai daya masuk bisa dilihat dari parameter tegangan dan arus, (Komputer and Jember, 2017). Hasil perhitungan dapat dilihat pada perhitungan berikut.

2.6.1 Rumus Konversi Kecepatan ke RPM

$$N = \frac{25}{3\pi r} v \dots\dots\dots (2. 2)$$

Keterangan :

N : Rotasi Per menit (RPM)

r : jari jari roda (m)

v : kecepatan (km/jam)

2.6.2 Daya Masuk

$$P_{in} = V \times I \dots\dots\dots (2. 3)$$

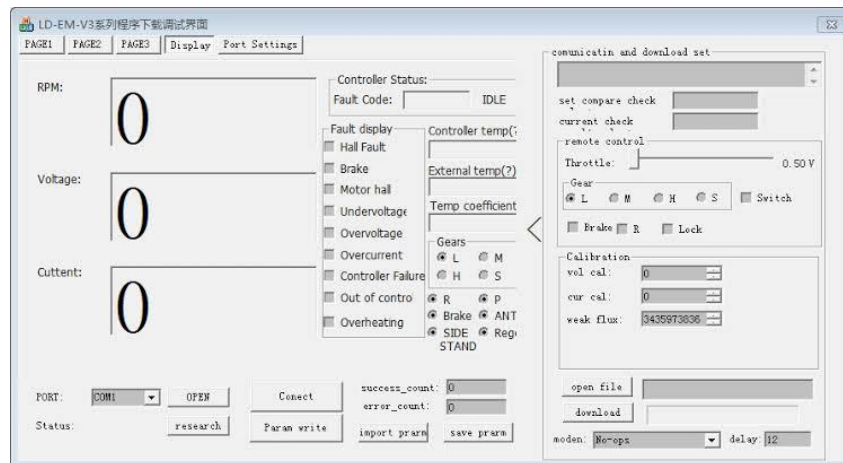
Keterangan :

P_{in} : daya masuk (W)

V : tegangan (V)

I : arus (A)

2.7 Votol Software V3



Gambar 2. 13 Votol Software V3

Sumber: (Antonius, 2020).

Pada Gambar 2.13 merupakan *Software Votol V3* digunakan dalam pemrograman *controller* motor BLDC agar bisa mengendalikan motor listrik sehingga bisa diatur atau di setting sesuai kebutuhan dalam perancangan mobil listrik RAKISA, (Antonius, 2020).

2.8 Thermocam Thermal



Gambar 2. 14 Thermocam Bosch GTC 400

Pengaturan yang tepat untuk kecepatan, arus, dan tegangan motor BLDC dapat mempengaruhi efisiensi energi, umur motor, dan kinerja keseluruhan aplikasi di mana motor tersebut digunakan. Alat termogun dirancang untuk memantau suhu motor BLDC, *Controller* dan Baterai dengan menggunakan *thermocam* Bosch

GTC 400 C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Adapun spesifikasi *thermocam* Bosch GTC 400 C seperti pada Gambar 2.15

Technical Data

Performance data	
Measurement range	-10 °C to +400 °C
Measuring accuracy of IR	±3.0 °C
Resolution	0.1 °C
Thermal sensitivity (NETD)	<50 mK
Size of IR sensor	160x120 px
Number of measuring points	19200
Frame buffer (number of images)	500
Memory type	Internal memory
File format of image	.JPG
Dust and splash protection	IP 53
Display type	TFT LCD
Size of display	3,5"
Operating temperature	-10 – 45 °C
Storage temperature	-20 – 70 °C
Working range	0 m
Battery and power	
Power supply and runtime	4 x 1.5 V LR6 (AA) 1 x GBA 12V 1 x GBA 10.8V
Size and weight	
Weight	0,5 kg

Gambar 2. 15 Thermocam Bosch GTC 400

2.9 Osiloskop Hantek 6022BE



Gambar 2. 16 Osiloskop hantek 6022BE

Sumber: (Wiryadinata and Butar-butur, 2018)

Pada Gambar 2.16 menggunakan Osiloskop Hantek 6022 untuk menganalisis sinyal *duty cycle* pada motor Kontroller Votol EM-150 yang digunakan selanjutnya dilakukan pengujian bentuk sinyal yang dihasilkan sensor terhadap nilai *duty cycle* dan frekuensi. Bentuk sinyal ini dihasilkan menggunakan alat ukur osiloskop

HANTEK 6022BE. Osiloskop yang digunakan sebagai alat untuk membaca bentuk sinyal yang dihasilkan sensor dan mengirimkan bentuk sinyal ke personal komputer untuk menampilkan bentuk sinyal, (Fitriyah *et al.*, 2020). Metode analisa torsi dan kecepatan yang digunakan mengacu pada nilai *duty cycle* dan frekuensi yang dihasilkan.

2.10 ESP32 Microcontroller

ESP32 adalah mikrokontroler penerus dari ESP8266 yang diperkenalkan oleh *Espressif Systems* sesuai pada gambar 2.17. Keunggulan ESP32 meliputi modul WiFi yang terintegrasi dalam chip, jumlah pin yang lebih banyak dibandingkan dengan mikrokontroler lainnya, memori yang lebih besar, serta adanya dukungan untuk Bluetooth 4.0 *energy*.



Gambar 2. 17 ESP 32

ESP32 terdapat dua tombol push button, yaitu tombol reset dan flash. Pin outnya mencakup 18 pin ADC (*Analog Digital Converter*) untuk mengubah sinyal analog menjadi digital, 2 pin DAC (*Digital Analog Converter*) untuk mengubah sinyal digital menjadi analog, 16 pin PWM (*Pulse Width Modulation*), 10 pin sensor sentuh, 2 pin untuk antarmuka UART, serta pin antarmuka I2C, I2S, dan SPI.

Tabel 2. 5 Spesifikasi ESP32

Kategori	Spesifikasi
MCU	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 with 600 DMIPS
Wi-Fi	802.11 b/g/n tipe HT40
Bluetooth	tipe 4.2 dan BLE
Typical Frequency	160 MHz
SRAM	Ada
Total GPIO	36
Total SPI-UART-I2C-I2S	4-2-2-2
Resolusi ADC	12 bit
Suhu operasional Kerja	-40°C to 125°C

2.7 PZEM 017 DC Power Meter



Gambar 2. 18 PZEM 017 DC Power Meter

Gamnar 2.18 PZEM-017 adalah modul sensor yang menggunakan protokol komunikasi Modbus untuk mengukur keluaran DC seperti tegangan, arus, daya aktif, dan energi (KWh) seperti pada Gambar 2.17 . Modul ini dapat dihubungkan melalui kabel atau platform open-source lainnya. PZEM-017 dilengkapi dengan shunt resistor yang berfungsi mengurangi resistansi pada aliran arus tinggi dalam sirkuit elektronik. Ada beberapa jenis shunt resistor yang tersedia, termasuk 50A, 100A, 200A, dan 300A. Dalam penelitian ini,

digunakan shunt resistor 100A. Modul PZEM-017 tidak memiliki tampilan baru.

2.11 Komunikasi Serial RS-485

RS485 adalah teknik komunikasi data serial yang memungkinkan komunikasi antar unit pada jarak yang cukup jauh, hingga 1,2 km. Selain mendukung komunikasi multidrop (one to many) dengan jarak yang jauh, RS485 juga dapat menghubungkan hingga 32 unit beban sekaligus menggunakan dua kabel, tanpa memerlukan referensi ground yang sama antara unit-unit tersebut.

2.12 Modul SD-Card

SD Card Shield atau SD Module adalah solusi untuk mengirim data ke kartu SD. Gambar 2.19 menunjukkan SD Module.



Gambar 2. 19 Modul SD Card

Pinout dari *SD Card Shield* dapat dihubungkan ke Arduino atau mikrokontroler lainnya, sehingga berguna untuk menambah kapasitas penyimpanan dan pencatatan data. SD Card Shield ini bisa langsung dipasang pada Arduino dan dilengkapi dengan switch untuk memilih slot flash card. Keunggulan dari SD Module ini adalah:

1. Mendukung standar SD card dan Micro SD (TF) card.
2. Dilengkapi dengan switch untuk memilih slot flash card.

3. Bisa langsung dipasang pada Arduino.
4. Bisa digunakan dengan mikrokontroler lainnya.

2.13 Penelitian Terkait

Analisis torsi dan kecepatan pada mobil listrik telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian dengan berbagai macam penelitian yang dipublikasikan pada sebuah jurnal. Dari beberapa penelitian tersebut penulis jadikan sebagai perbandingan pada Tabel 2.6 sehingga dapat memperkuat pemahaman penulis mengidentifikasi torsi dan kecepatan berdasarkan beban mobil sekaligus setting pada software Votol pada penelitian ini.

Tabel 2. 6 Penelitian terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan jurnal
1	Pembuatan Mobil Listrik Untuk Kompetisi Tingkat Nasional	Antonius etc.	Politeknik ATMI Surakarta, 2020.	Penelitian ini membahas tentang Mobil Listrik Indonesia (KMLI) di Politeknik Negeri Bandung.. Tujuan dari tugas akhir ini adalah membuat mobil listrik yang akan diikutkan KMLI serta menghitung koefisien gesek sistem, (Nugraha <i>et al.</i> , 2020).
2.	Prototipe Mobil Listrik Menggunakan Brushless Dc Motor 350 Watt	Randi Setiawan	Universitas Negeri Jakarta, 2016.	Tujuan pembuatan penelitian ini adalah mendesain, membuat dan menguji prototipe mobil listrik yang mampu menempuh jarak 300 meter/Wh dengan menggunakan brushless motor DC 350 watt.

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan jurnal
				Fokus penelitian ini adalah implementasi BLDC motor sebagai penggerak prototype mobil listrik, (Setiawan, 2016).
3.	Analisa Pengaruh Berat Dan kecepatan Terhadap Konsumsi Daya Blde 350w.	Mohammad Bahrodin Wahid dan Satworo Adiwidodo.	Politeknik Negeri Malang, 2021.	Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan apakah berat beban dan kecepatan akan berpengaruh terhadap konsumsi daya motor BLDC 350w.
4	Perancangan Mobil Listrik Menggunakan Motor DC Brushed 36 Volt 450 Watt	Achmad Rizky etc.	Universitas Budi Luhur , 2022.	Penelitian ini menjelaskan proses pembuatan mobil listrik yang dirancang menggunakan motor penggerak jenis DC (Direct Current) Brushed 36 Volt 450 Watt, (Fath <i>et al.</i> , 2022).
5.	Studi Perencanaan Pengaturan kecepatan Motor BLDC pada Gerobak Listrik dengan Driver Votol EM-30S	Eka Samsul Ma'arif etc.	Universitas Muhammadiyah Jakarta, 2022.	Motor penggerak listrik yang digunakan adalah BLDC 500 Watt dengan driver Votol EM-30S.Studi perhitungan kecepatan gerobak dilakukan dengan mengukur diameter roda yang diformulasikan dengan perhitungan kecepatan putaran motor BLDC, (Samsul,

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan jurnal
				Dermawan and Chamdareno, 2022).
6.	Pengujian Motor Brush Less Direct Current Kapasitas Daya 800w Dan 1000w Pada Kondisi Berbeban.	Wandra Nurcahya.	Universitas Jember, 2016.	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa kendaraan listrik secara real – time pada berbagai jenis lintasan jalan agar diketahui tingkat konsumsi energi serta keunggulan dan kekurangannya apabila digunakan pada kondisi jalan raya yang sesungguhnya..
7.	Analisis Sistem Penggerak Motor BLDC Pada Mobil Listrik Ponocar	Dwi Harjono dan Wahyu Widodo.	Politeknik Negeri Pontianak, 2021.	Penelitian ini dilakukan dengan membangun mobil listrik mini kart Pontianak Electric Car (PonECar). Hasil pengujian ini dilakukan dengan menempuh jarak (s) sejauh 200 meter, jarak pembebanan ke pusat rotasi (roda) = 0,25 m..
8	<i>Performance Test of Three-Phase Brushless Direct Current Motor Axial Flux with Differences Diameter of</i>	Alif Willis Nurmalia etc.	Universitas Negeri Jember, 2021.	Paper ini membahas mengenai performa motor brushless direct current 3 fasa fluks aksial dengan variasi perbedaan diameter magnet permanen neodymium dengan ukuran 15mm x 2mm dan 20mm x 2mm.

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan jurnal
	<i>Neodymium Type Permanent Magnet</i>			Pengujian yang dilakukan sebanyak 2 kali dengan kondisi motor tanpa menggunakan beban dan menggunakan beban dengan 4 variasi tegangan sumber. Paper ini meninjau nilai kecepatan dan torsi yang dihasilkan saat melakukan perbandingan 2 magnet permanen jenis neodymium yang memiliki perbedaan dalam ukuran, (Nurmalia, Hadi and Cahyadi, 2021).
9	Perancangan Motor Listrik Blde 10 Kw Untuk Sepeda Motor Listrik	Wahyudi Budi Pramono etc.	Universitas Islam Indonesia, 2016.	Penelitian ini membahas tentang perancangan motor BLDC 3 fase untuk aplikasi electric vehicle dengan menggunakan finite element simulasi telah menyajikan dan mensimulasi 3 fase dua lapisan kumparan BLDC.
10.	<i>Torque Analysis of 2 KW BLDC (Brushless Direct Current) Motor with Speed</i>	Bambang Darmono etc.	Universitas Mercubuana, 2021)	Mobil listrik KMLI E-Falco menggunakan motor listrik tipe BLDC dengan kapasitas daya 2 kW. Untuk mengetahui besarnya torsi motor BLDC 2 kW saat

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan jurnal
	<i>Variations in Electric Cars E-Falco</i>			dikendarai dengan variasi kecepatan dapat dilakukan dengan perhitungan manual menggunakan Persamaan torsi dan melakukan dynotest.