

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Terminologi Dasar

2.1.1 Kecepatan dan Percepatan

Pengertian kecepatan adalah kemampuan untuk melakukan gerakan-gerakan yang sejenis secara berturut-turut dalam waktu sesingkat-singkatnya atau kemampuan untuk menempuh suatu jarak dalam waktu yang cepat.

Kecepatan itu sendiri artinya adalah perpindahan yang ditempuh dalam selang waktu tertentu sedangkan percepatan adalah perubahan kecepatan sebuah benda dalam selang waktu tertentu.

2.1.2 Energi Listrik

Energi menurut Eugene C. Lister bahwa energi merupakan kemampuan untuk melakukan kerja, energi merupakan kerja tersimpan. Pengertian ini tidaklah jauh beda dengan ilmu fisika yaitu sebagai kemampuan melakukan usaha (A. Wahid et al., 2014). Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat pula dimusnahkan. Energi hanya dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk energi yang lain. Demikianlah pula energi listrik yang merupakan hasil perubahan energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik. Keberadaan energi listrik ini dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin. Adapun kegunaan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari merupakan penerangan, pemanas, motor motor listrik dan lain-lain. Energi yang digunakan alat listrik merupakan laju

penggunaan energi (daya) dikalikan dengan waktu selama alat tersebut digunakan. Bila daya diukur dalam watt jam maka :

$$W = P \times t \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan:

P = daya dalam watt

t = Waktu dalam jam

W = Energi dalam watt jam

Watt jam merupakan energi yang dikeluarkan jika 1 watt digunakan selama 1 jam. Dan untuk mencari nilai dari daya itu sendiri adalah dari tegangan dikalikan dengan arus

$$P = V \times I \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan

V = Tegangan

I = Arus

2.2 Motor Listrik

Motor listrik adalah merupakan sebuah perangkat elektromagnetis, yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik dapat digunakan untuk memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan dan lain sebagainya (Sidiq, 2015). Motor listrik adalah perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui prinsip elektromagnetik. Motor listrik memiliki gulungan kawat yang diatur

secara khusus dan ditempatkan di dalam medan magnet, yang ketika dialiri listrik, menyebabkan rotasi pada poros motor. Gerakan rotasi inilah yang kemudian menghasilkan energi mekanik.

Cara kerja motor listrik menggunakan energi listrik dan energi magnet yang dapat menghasilkan suatu energi mekanis, dimana operasi motor tersebut adalah tergantung pada interaksi dua medan magnet. Secara sederhana dapat dikatakan, bahwa motor listrik adalah bekerja menggunakan prinsip dua medan magnet yang dibuat berinteraksi untuk menghasilkan gerakan. Adapun tujuan dari motor listrik, adalah untuk menghasilkan suatu gaya yang dapat menggerakkan atau torsi (Adiwidodo & M. B. Wahid, 2021).



Gambar 2. 1 Motor Listrik

Sumber : (Devianti, 2023)

2.2.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja dari motor listrik yaitu dari Konduktor yang mengalirkan arus mempunyai medan magnet di sekelingnya. Arahnya dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan. Kuat medan tergantung pada besarnya arus yang mengalir dalam konduktor.

Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum sama yaitu:

- 1) Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya
- 2) Jika kawat pembawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/loop, maka kedua sisi loop atau pada sudut kanan medan magnet akan mendapat gaya pada arah yang berlawanan.
- 3) Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar/torque untuk memutar kumparan.
- 4) Motor-motor memiliki beberapa loop pada dinamanya, yang berguna untuk memberi tenaga putaran yang lebih seragam. Medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik, yang disebut sebagai kumparan medan.

2.2.2 Bagian Pada Motor AC

Pada Motor AC umumnya terdapat 2 bagian utama yaitu stator dan rotor, berikut merupakan penjelasan dari kedua bagian tersebut:

A. Stator

Pada stator motor induksi terdapat belitan menurut jenis motornya, misalnya motor satu fasa maka statornya terdapat belitan satu fasa yang disuplai oleh sumber listrik satu fasa, sedangkan untuk jenis motor tiga fasa maka statornya terdapat belitan tiga fasa yang disuplai oleh sumber listrik tiga fasa. Jumlah kutub akan menentukan besarnya kecepatan motor. Lebih banyak jumlah kutubnya, maka kecepatannya akan menurun dan sebaliknya jika jumlah kutubnya semakin sedikit, maka kecepatannya akan meningkat.

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing – masing berbeda fasa dan menerima arus dari tiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat – plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnetik putar. Karena adanya flux magnetik putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.

B. Rotor

Arahnya melawan fluksi yang mengimbas, dalam hal ini arus rotor itu ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator, untuk mengurangi beda kecepatan diatas. Jika rotor dibebani, maka putaran rotor akan turun sehingga terjadi perbedaan putaran antara rotor dan stator, perbedaan kecepatan putaran ini disebut slip.

Ini adalah bagian yang berputar dari motor. Seperti dengan stator atas rotor terdiri dari satu set laminasi baja beralur ditekan bersama dalam bentuk jalur magnetik silinder dan sirkuit listrik

2.2.3 Bagian Pada Motor DC

Pada Motor DC terdapat 4 bagian utama yaitu Stator, rotor, komutator dan brush, berikut merupakan penjelasan dari bagian tersebut:

A. Stator

Fungsi stator sebagai bagian dari rangkaian magnetic, karena itu mempunyai seperangkat kutub medan yang dipasangkan di dalam stator. Secara sederhana motor DC memiliki dua kutub medan, dan garis magnetik energi membesar melintas antara kutub-kutub (Jovenda, 2012).

B. Rotor

Fungsi dari rotor adalah untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gerak putar. Rotor terdiri dari poros baja dimana tumpukan berkeping-keping inti yang berbentuk silinder terjepit. Pada inti terdapat alur- alur dimana lilitan rotor diletakan. (Harjono & Widodo, 2021)

C. Komutator

Konstruksi dari komutator terdiri dari batangan tembaga yang dikeraskan/diisolasi dengan sejenis mika. Fungsi komutator adalah mengumpulkan arus induksi dari konduktor jangkar dan mengkorversinya menjadi arus searah melalui sikat.

D. Sikat

Sikat (Brush) adalah terbuat dari campuran bahan karbon yang dilengkapi dengan pegas penekan dan kontak sikatnya. Brushes

biasanya dipasang dengan ditumpangkan pada sisi komutator, yang kegunaannya adalah untuk menyuplai listrik ke motor.

2.3 Brushless DC Motor (BLDC)

Salah satu perangkat yang sangat penting dari sebuah kendaraan listrik yaitu aktuator. Aktuator pada kendaraan listrik umumnya menggunakan motor penggerak bernama Brush Less DC Motor. BLDC motor atau dapat disebut juga dengan BLAC motor merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki BEMF berbentuk trapezoid sedangkan BLAC memiliki BEMF berbentuk sinusoidal. Walaupun demikian keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode six-step maupun metode PWM. Dibandingkan dengan motor DC jenis lainnya, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya brush. (Rahadyan et al., 2014)

Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor jenis lain, metode pengendalian motor BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan, karena tidak adanya brush yang menunjang proses komutasi dan harga untuk motor BLDC jauh lebih mahal.

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik DC, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan

dengan mobil berbahan bakar BBM secara umum. Hal yang paling utama adalah mobil listrik tidak menghasilkan polusi udara, selain itu mobil listrik juga mengurangi efek rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya (Jovenda, 2012)



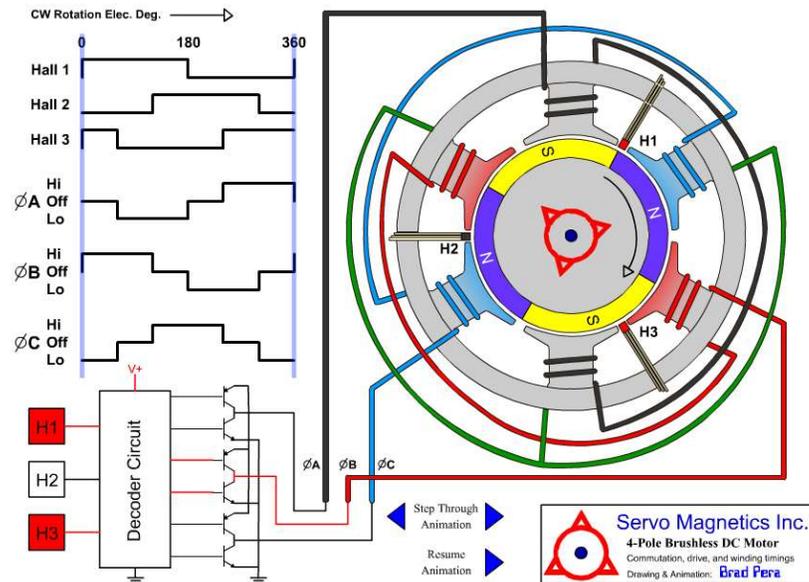
Gambar 2. 2 Motor Listrik BLDC

Pada gambar 2.3 merupakan contoh Motor Listrik BLDC, pada konstruksi atau komponen besar yang ada pada motor listrik BLDC adalah Rotor, Stator dan Hall Sensor.

2.3.1 Prinsip Kerja Motor Listrik BLDC

Prinsip kerja dari motor BLDC adalah gaya tarik menarik antara magnet permanen pada rotor dan elektromagnet pada stator, saat suatu kutub akan saling tolak menolak dengan kutub yang sejenisnya begitupun sebaliknya akan saling tarik menarik jika magnetnya berlawanan kutub. Motor BLDC adalah motor yang membutuhkan arus DC pada kontrolnya dan membutuhkan arus AC 3 fasa untuk menggerakkan bagian rotor motornya. Perubahan arus ini terjadi pada kontroller karena adanya inverter yang merubah input AC menjadi DC pada motor listrik. Pada kerjanya, setiap lilitan pada stator

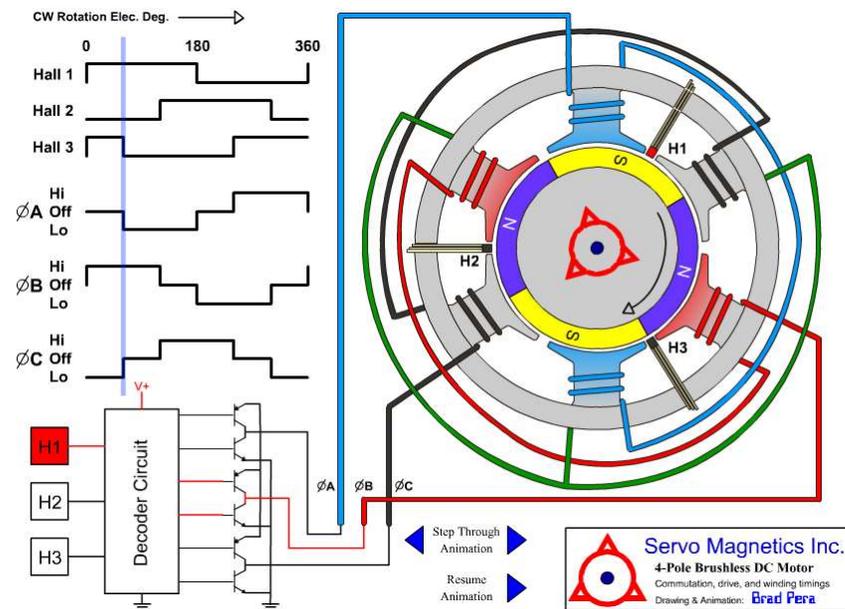
saling bergantian dialiri arus listrik sehingga terjadi gaya tarik menarik antara kutub yang berlawanan pada rotor dan stator.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Motor BLDC 1

Sumber : (Achmad Nur Husaini, 2015)

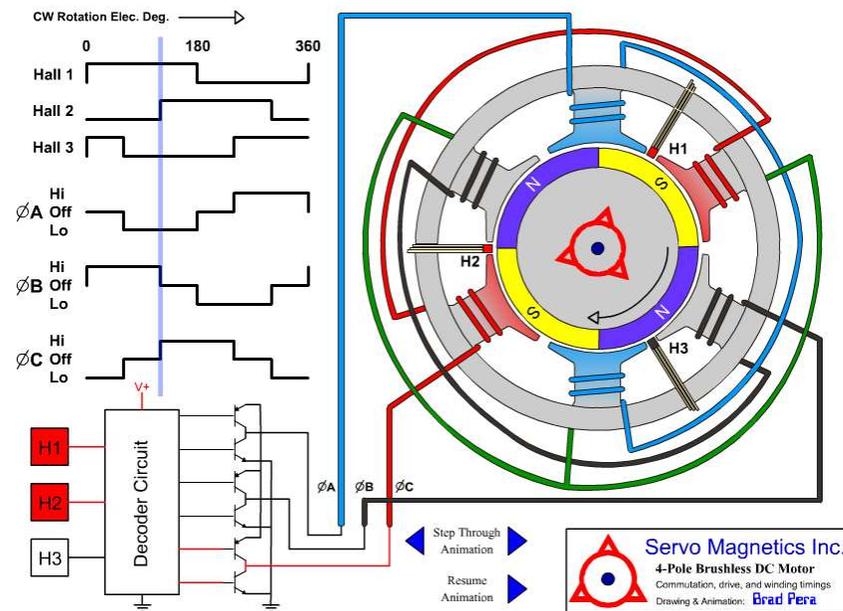
Berdasarkan gambar 2.4 dapat diartikan yaitu Pertama,. Pada gambar diatas hall sensor H1 dan H3 bernilai 1 karena mengalami perubahan medan magnet. Sehingga kontroler akan mengalirkan arus pada lilitan B dan C. Lilitan B menjadi kutub utara dan lilitan C menjadi kutub selatan. Kutub utara oleh lilitan B akan memberikan tolakan pada kutub utara magnet rotor, sedangkan kutub selatan lilitan C akan menarik kutub utara magnet rotor.



Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Motor BLDC 2

Sumber: (Achmad Nur Husaini, 2015)

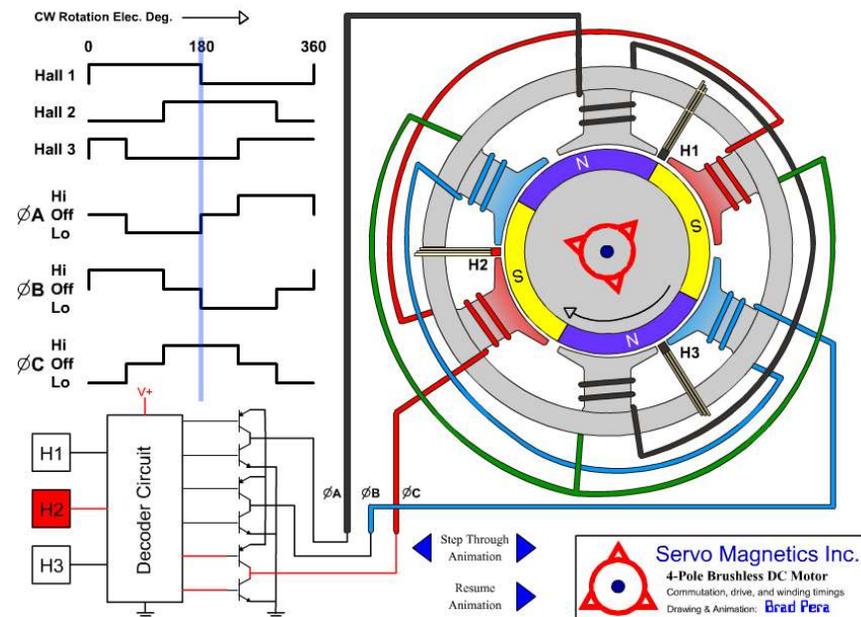
Berdasarkan gambar 2.5 merupakan Langkah kedua, hanya sensor H1 yang bernilai “high”, sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan A dan B harus dialiri arus. Lilitan A menghasilkan kutub selatan dan lilitan B tetap menghasilkan kutub utara. Kutub selatan lilitan A akan menolak kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan B menolak kutub utara dari magnet rotor



Gambar 2. 5 Prinsip Kerja Motor BLDC 3

Sumber: (Achmad Nur Husaini, 2015)

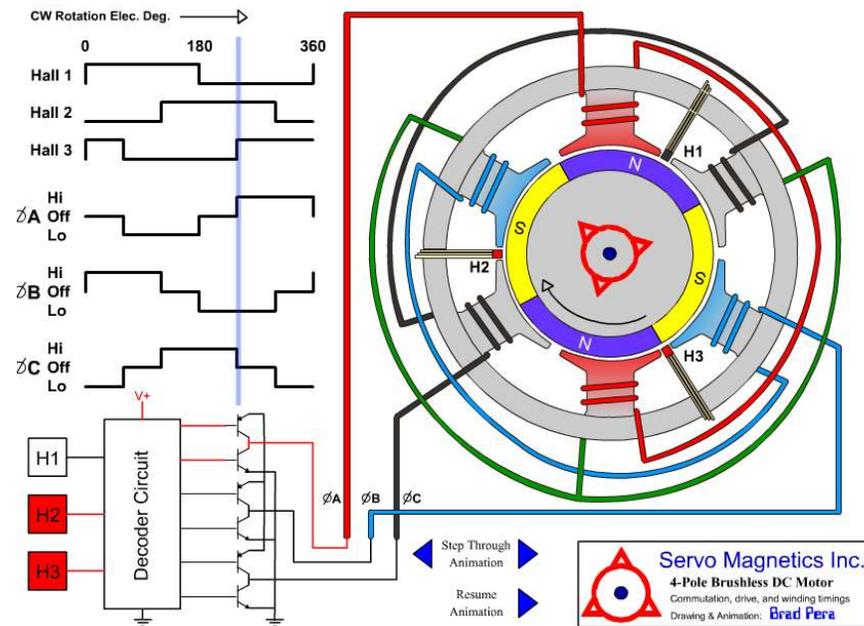
Berdasarkan gambar 2.6 merupakan Langkah ketiga, sensor H1 dan H2 akan bernilai 1. Sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan A dan C dialiri arus. Lilitan A tetap menghasilkan kutub selatan dan lilitan C menghasilkan kutub utara. Kutub selatan lilitan A akan menolak kutub selatan dan menarik kutub utara pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan C menarik kutub selatan dari magnet rotor.



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Motor BLDC 4

Sumber: (Achmad Nur Husaini, 2015)

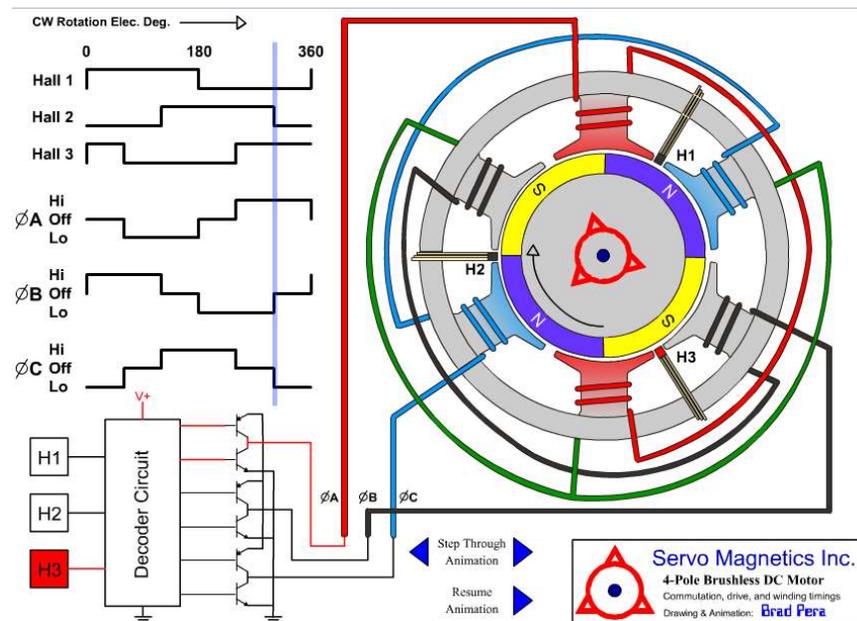
Berdasarkan gambar 2.7 merupakan Langkah keempat, hanya sensor H2 yang bernilai 1. Sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan B dan C dialiri arus. Lilitan B menghasilkan kutub **selatan** dan lilitan C tetap menghasilkan kutub **utara**. Kutub selatan lilitan B akan menolak kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan C menarik kutub selatan dari magnet rotor.



Gambar 2. 7 Prinsip Kerja Motor BLDC 5

Sumber: (Achmad Nur Husaini, 2015)

Berdasarkan gambar 2.8 merupakan Langkah kelima, sensor H2 dan H3 bernilai 1. Sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan A dan B dialiri arus. Lilitan A menghasilkan kutub **utara** dan lilitan B tetap menghasilkan kutub **selatan**. Kutub utara lilitan A akan menolak kutub utara dan menarik kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub selatan lilitan B menolak kutub selatan dari magnet rotor.



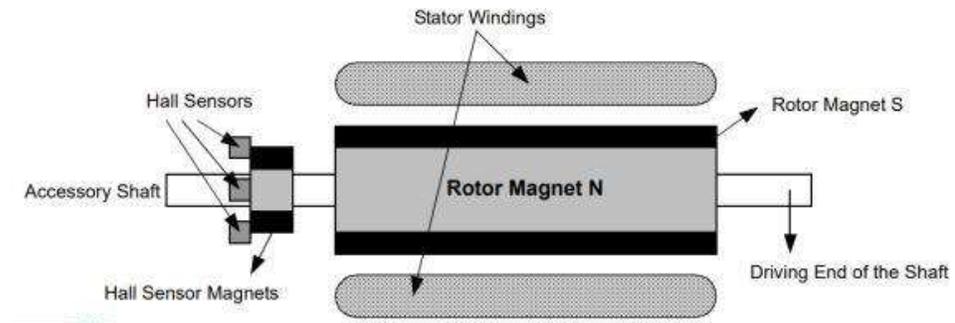
Gambar 2. 8 Prinsip Kerja Motor BLDC 6

Sumber: (Achmad Nur Husaini, 2015)

Berdasarkan gambar 2.9 merupakan Langkah keenam atau terakhir pada siklus komutasi, hanya sensor H3 yang bernilai 1. Sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan A dan C dialiri arus. Lilitan A tetap menghasilkan kutub utara dan lilitan C menghasilkan kutub selatan. Kutub utara lilitan A akan menarik kutub selatan dan menolak kutub utara pada magnet rotor. Sedangkan kutub selatan lilitan C menarik kutub utara dari magnet rotor.

Keenam proses di atas akan mengalami pengulangan hingga membentuk suatu siklus. Hal inilah yang menyebabkan motor terus berputar secara kontinyu selama sumber arus DC masih ada

2.3.2 Konstruksi Motor Listrik BLDC



Gambar 2. 9 Kontruksi Motor BLDC

sumber : (*Principle of Brushless Motor*, 2016)

Berdasarkan gambar 2.10 dijelaskan bahwa motor BLDC mempunyai beberapa bagian penting, berikut merupakan bagain-bagian yang ada pada BLDC:

A. Rotor

Terbuat dari magnet permanen yang dapat terdiri dari dua hingga delapan pasang kutub dengan alternatif kutub utara dan kutub selatan. Berdasarkan kebutuhan kerapatan medan magnet, bahan magnetic yang tepat dipilih untuk membuat rotor. Magnet besi secara umum digunakan untuk membuat magnet permanen. (Padmaraja Yedamale, 2003).

B. Stator

Stator terdiri dari tumpukan laminasi baja dengan lilitan yang ditempatkan pada celah yang dipotong aksial pada sepanjang pinggir lingkaran. Ada dua macam jenis pada stator: motor trapesium dan spiral. Perbedaan ini dibuat atas dasar hubungan antar kumparan di lilitan stator untuk memberikan berbagai jenis arah balik gaya listrik. Stator motor trapesium menunjukkan pemberian arah balik gaya

listrik berbentuk trapesium sedangkan stator motor spiral pemberian arah balik gaya listrik berbentuk spiral. (Padmaraja Yedamale, 2003)

C. Hall Sensor

Hall sensor atau hall-effect sensor adalah merupakan sensor, yang dapat digunakan untuk mendeteksi medan magnet. Hall-effect sensor akan dapat menghasilkan sebuah tegangan yang tepat dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut (Jani, 2009)

D. Controller

Rangkaian kontrol selain sebagai pengontrol perpindahan arus juga sebagai pengarah putaran rotor. Oleh karena itu, kontroller membutuhkan beberapa cara untuk menentukan orientasi rotor (Jani, 2009).

2.3.3 Kelebihan Motor Listrik BLDC

Adapun beberapa kelebihan yang dimiliki oleh motor listrik BLDC, yaitu :

1. Pergantian elektronik menggantikan pergantian mekanis tradisional, kinerja yang andal, tidak ada keausan, tingkat kegagalan yang rendah, dan harapan hidup sekitar 6 kali lebih tinggi dari motor sikat, mewakili arah pengembangan kendaraan listrik.
2. Ini adalah motor statis dengan arus tanpa beban kecil
3. Efisiensi tinggi.
4. Ukuran kecil.

5. Motor brushless lebih efisien karena kecepatannya ditentukan oleh frekuensi di mana arus disuplai, bukan tegangan.
6. Karena sikat tidak ada, kehilangan energi mekanik karena gesekan kurang yang meningkatkan efisiensi.
7. Motor BLDC dapat beroperasi pada kecepatan tinggi dalam kondisi apapun.
8. Tidak ada percikan dan lebih sedikit kebisingan selama operasi.
9. Lebih banyak elektromagnet dapat digunakan pada stator untuk kontrol yang lebih presisi.
10. Motor BLDC berakselerasi dan deselerasi dengan mudah karena memiliki inersia rotor yang rendah.
11. Ini adalah motor berkinerja tinggi yang memberikan torsi besar per inci kubik pada rentang kecepatan yang luas.
12. Motor BLDC tidak memiliki sikat yang membuatnya lebih andal, harapan hidup yang tinggi, dan pengoperasian yang bebas perawatan.
13. Motor semacam itu didinginkan secara konduksi dan tidak diperlukan aliran udara untuk pendinginan di dalam

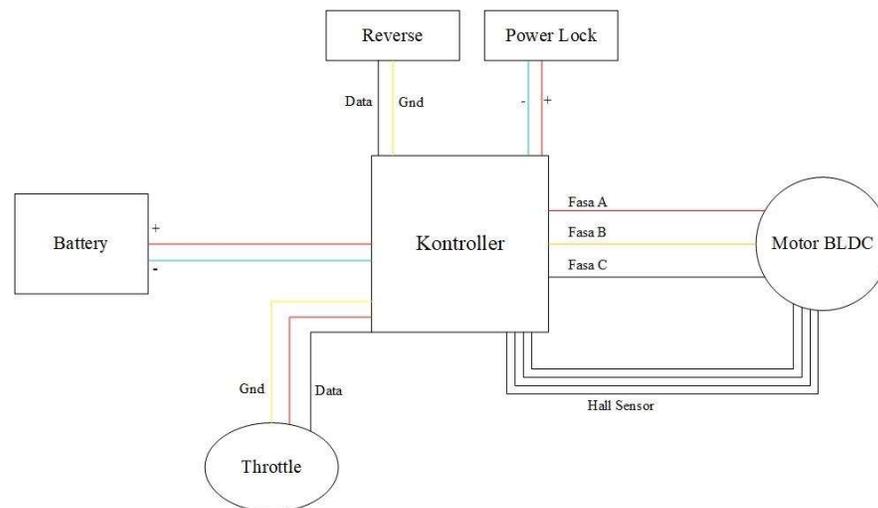
2.4 Mobil Listrik

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik DC, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan mobil berbahan bakar BBM secara umum. Hal yang paling utama adalah mobil listrik tidak menghasilkan polusi udara, selain itu mobil listrik juga mengurangi efek rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya.

Mobil listrik jauh lebih hemat energi dibandingkan dengan mobil berbahan bakar konvensional. Efisiensi keseluruhan mobil listrik adalah 48%, secara signifikan lebih baik dibandingkan dengan mobil berbahan bakar konvensional yang mencapai efisiensi sekitar 25%. Tidak seperti mobil tradisional, mesin mobil listrik sangat halus sehingga mereka tidak menyebabkan masalah polusi suara. Mobil listrik juga menjamin keamanan maksimum karena tidak melibatkan bahan bakar minyak sehingga tidak akan terbakar atau meledak jika menabrak sesuatu (Suendri et al., 2018)

2.4.1 Prinsip Kerja

Pada dasarnya prinsip kerja dari mobil listrik sangat beragam tetapi jika didefinisikan secara umum Mobil listrik adalah kendaraan yang sepenuhnya atau sebahagiannya digerakkan oleh motor menggunakan listrik di baterai. Baterainya dapat diisi ulang.



Gambar 2. 10 Prinsip Kerja Mobil Listrik

Gambar 2.11 menunjukkan prinsip kerja dari mobil listrik. Dimulai dari battery menyuplai listrik, kemudian arus masuk ke kontroller sebagai pusat pengatur gerak motor atau bisa disebut juga sebagai “otak” dari sistem motor BLDC. Didalam kontroller arus diproses ke beberapa bagian yaitu *throttle*, *reverse*, *power lock* dan ke motor BLDC. Untuk menggerakkan motor BLDC arus yang disuplai adalah arus AC, sedangkan arus yang masuk ke kontroller adalah DC. Perubahan arus terjadi karena pada kontroller terdapat inverter yang mengubah arus AC menjadi DC. Bagian *throttle* merupakan bagian yang memiliki fungsi ketika ingin menaikkan kecepatan pada mobil listrik. Pada konsep menaikkan kecepatan mobil listrik, disini ketika *throttle* diinjak secara penuh maka kontroller akan memberikan perintah ke hall sensor untuk memberikan frekuensi arus yang lebih tinggi pada kumparan stator sehingga putaran motor listrik semakin cepat. Setelah energi listrik dikonversi menjadi energi mekanik pada motor listrik, kemudian motor listrik dihubungkan dengan beban atau gear pada mobil listrik dengan rantai yang nantinya akan menggerakkan roda pada mobil listrik.

2.4.2 Mobil Listrik Tenaga Surya

Mobil listrik dengan menggunakan sel surya adalah kendaraan yang memanfaatkan sel surya untuk mengonversi sinar matahari menjadi energi listrik untuk kemudian disimpan pada baterai yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan motor listrik dan motor listrik inilah yang menjadi penggerak utama pada mobil listrik.

Pembuatan mobil listrik dengan menggunakan tenaga surya umumnya didasarkan karena ingin mengembangkan pemanfaatan dari energi baru terbarukan, selain itu juga untuk meminimalisir konsumsi listrik yang berasal dari PLN sehingga dapat menghemat pengeluaran untuk mengisi baterai dari mobil listrik itu sendiri.

2.4.3 Struktur Mobil Listrik Tenaga Surya

Pada mobil tenaga surya energi listrik yang digunakan berasal dari sinar matahari yang kemudian di tangkap oleh panel surya untuk kemudian diubah menjadi energi listrik. Lalu energi listrik tersebut akan disimpan pada baterai, baterai ini yang memasok energi listrik sebagai sumber energi yang akan menggerakkan mobil. Dari baterai terlebih dahulu melewati controller untuk mengatur arus keluaran dan kendali atas motor yang akan digunakan sebagai penggerak dari mobil listrik. Setelah melewati controller energi listrik akan mengalir menuju motor, motor inilah yang menjadi penggerak utama pada mobil listrik, motor berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak, kemudian motor tersebut dihubungkan dengan ban, putaran dari motor akan menggerakkan ban mobil yang kemudian akan menyebabkan mobil bergerak.

2.4.4 Kelebihan dan Kekurangan Mobil Listrik

Mobil listrik mempunyai banyak kelebihan, berikut merupakan kelebihan dari mobil listrik tenaga surya:

- 1) Tidak ada gas hasil pembakaran sehingga lebih ramah lingkungan
- 2) sumber energi listrik berasal dari energi matahari sehingga bisa mengurangi ketergantungan terhadap energi berbahan fosil.

- 3) Tidak ada biaya pengisian energi listrik
- 4) Dapat mengisi daya dimana saja selama masih ada cahaya matahari

Mobil listrik tenaga surya juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya adalah sebagai berikut:

- 1) Harga baterai mobil listrik masih tinggi. Baterai yang mahal ini masih menjadi alasan utama di balik tingginya harga mobil listrik secara keseluruhan.
- 2) Fakta bahwa mobil listrik tidak bersuara saat hidup tak selalu merupakan suatu keuntungan karena senyapnya suara mobil bisa menimbulkan bahaya bagi orang buta, orang tua dan anak-anak.
- 3) Pengisian baterai yang lama karena bergantung pada intensitas matahari yang fluktuatif.
- 4) Saat ini panel surya efisiensinya masih terbilang rendah sehingga untuk mendapatkan daya listrik yang cukup besar memerlukan ruang yang luas.