

**PROTOTIPE MOBIL LISTRIK MENGGUNAKAN *BRUSHLESS*
DC MOTOR 350 WATT**


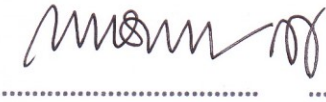


**RANDI SETIAWAN
5215111746**

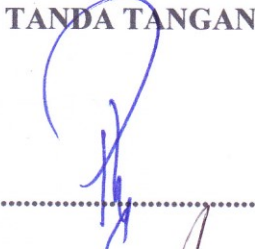
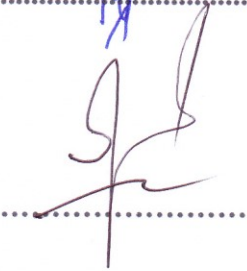

Skripsi ini Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Memperoleh Gelar
Sarjana

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRONIKA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
2016**

LEMBAR PENGESAHAN

| NAMA | TANDA TANGAN | TANGGAL |
|--|--|-----------|
| <u>Drs. Jusuf Bintoro, MT.</u> (Dosen Pembimbing I) |  | 27-1-2016 |
| <u>Drs. Wisnu Djatmiko, MT.</u> (Dosen Pembimbing II) |  | 27-1-2016 |

PENGESAHAN PANITIA UJIAN SIDANG

| NAMA | TANDA TANGAN | TANGGAL |
|--|--|-----------|
| <u>Drs. Pitoyo Yuliatmojo, MT.</u> (Ketua Sidang) |  | 27-1-2016 |
| <u>Dr. M. Sukardjo, M.Pd.</u> (Sekretaris) |  | 27-1-2016 |
| <u>Efri Sandi, MT.</u> (Dosen Ahli) |  | 26-1-2016 |

Tanggal Lulus : 20 Januari 2016

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri dan semua sumber baik yang di kutip maupun di rujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Jakarta, Desember 2015
Yang Membuat Pernyataan

Randi Setiawan

5215111746

ABSTRAK

Randi Setiawan. *Prototipe Mobil Listrik Menggunakan BLDC Motor 350 Wat.* Skripsi, Jakarta, Program Studi Pendidikan Teknik Elektronika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, 2015. Dosen Pembimbing, Drs. JUSUF BINTORO, M.T dan Drs. Wisnu Djatmiko, M.T.

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 wat.

Sistem penggerak pada mobil ini menggunakan *brushless* DC motor dengan spesifikasi daya maksimum 350 wat dan baterai jenis Lead Acid kapasitas 20 Amper dengan tegangan kerja 36 Volt. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Research and Development* yang meliputi penelitian dan pengumpulan informasi (Research and Information Collecting), perencanaan (Planning), pengembangan bentuk awal produk (Develop Preliminary Form of Product), uji lapangan (Field Test), dan revisi produk (Product Revision).

Fokus skripsi ini adalah implementasi BLDC motor sebagai penggerak prototipe mobil listrik. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, prototipe Mobil listrik mengkonsumsi daya sebesar 6 Wh selama 15 menit dengan kecepatan maksimal 38 Km/Jam. Mobil listrik pada satu putaran lintasan sepanjang 800 meter membutuhkan konsumsi daya 2,56 Wh dengan beban pengemudi seberat 50 Kg tanpa melepas bukaan throttle.

Kata Kunci: Prototipe, mobil listrik, BLDC motor

ABSTRACT

Randi Setiawan. *Electric Car Prototype Using BLDC Motor 350 Watt. Bachelor Thesis, Jakarta, Education Program Electronic Engineering, Faculty of Engineering, State University of Jakarta, 2015. Supervisor, Drs. JUSUF BINTORO, M.T and Drs. WISNU DJATMIKO, M.T.*

The purpose of making this study is to design, build and test a prototype electric car which can cover a distance of 300 m/Wh by using a brushless DC motor 350 watt.

The drive system of this car using a brushless DC motor with specifications of maximum power is 350 watt and battery types is Lead Acid battery which has capacity 20 amperes with a working voltage of 36 volts. This research was conducted using the method of Research and Development, which includes Research and Information Collecting, planning, Develop Preliminary Form of Product, Field Test, and Product revision.

The focus of this Bachelor Thesis is the implementation of BLDC motors as driving an electric car prototype. Based on the research that has been done, this prototype electric car consumes a power of 6 Wh for 15 minutes at a maximum speed of 38 Km / Hr. This electric car on a 800-meter laps requires a power consumption of 2.56 Wh with a load weighing 50 Kg driver without removing the throttle opening.

Keywords: Prototype, electric car, BLDC motors

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Prototipe Mobil Listrik Menggunakan *Brushless* Dc Motor 350 Watt”. Semoga penelitian skripsi ini dapat dipergunakan sebagai salah satu acuan, petunjuk maupun pedoman bagi pembaca.

Penyusunan skripsi ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Pendidikan Teknik Elektronika UNJ. Peneliti menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih belum sempurna sehingga Penulis membutuhkan kritik dan saran untuk membangun penyempurnaan skripsi ini.

Banyak hal yang penulis rasakan selama proses pengerjaan skripsi ini dan banyak pihak yang telah membantu penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Pitoyo Yuliatmojo, MT, selaku Ketua Program Studi Pendidikan Teknik Elektronika UNJ.
2. Drs. Jusuf Bintoro, MT, selaku Dosen Pembimbing I .
3. Drs. Wisnu Djatmiko, MT, selaku Dosen Pembimbing II.
4. Drs. Rimulyo Wicaksono, M.Pd, selaku Pembimbing Akademik.
5. Kedua orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan semangat serta doa di setiap sujud dan tahajudnya.

Akhir kata, semoga Allah Subhanahu wa Ta’ala membalas segala kebaikannya.

Penulis

Randi Setiawan
NIM. 5215111746

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| ABSTRAK..... | i |
| ABSTRACT..... | i |
| KATA PENGANTAR | ii |
| DAFTAR ISI..... | iii |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| DAFTAR TABEL..... | ix |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | x |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Identifikasi Masalah..... | 4 |
| 1.3 Batasan Masalah | 4 |
| 1.4 Perumusan Masalah | 5 |
| 1.5 Tujuan Penelitian | 5 |
| 1.6 Manfaat Penelitian | 5 |
| BAB II KERANGKA TEORETIK, KERANGKA BERPIKIR DAN HIPOTESIS PENELITIAN | 6 |
| 2.1 Kerangka Teoretik..... | 6 |
| 2.1.1 Mobil Listrik..... | 6 |
| 2.1.1.1. Sejarah Mobil Listrik..... | 6 |
| 2.1.1.2. Perkembangan Mobil Listrik..... | 8 |
| 2.1.1.3. Blok Diagram Mobil Listrik Pada Umumnya | 9 |
| 2.1.1.4. Blok Diagram Mobil Listrik Yang Kompleks..... | 9 |

| | | |
|-------------------------------------|---|----|
| 2.1.2 | BLDC Motor | 10 |
| 2.1.3 | Pengendalian BLDC Motor | 12 |
| 2.1.3.1 | Metode PWM <i>Six-Step Comutation</i> | 14 |
| 2.1.3.2 | Hall Sensor | 15 |
| 2.1.3.3 | Inverter Mosfet Tiga Fasa | 16 |
| 2.1.3.4 | Arduino..... | 18 |
| 2.1.4 | Baterai..... | 24 |
| 2.1.5 | Daya..... | 26 |
| 2.1.6 | Prototipe Mobil Listrik | 26 |
| 2.2 | Kerangka Berpikir..... | 27 |
| 2.2.1 | Blok Diagram Prototipe Mobil Listrik dengan BLDC Motor 350 Wat | 28 |
| 2.2.2 | Blok Diagram <i>Controller</i> BLDC Motor..... | 29 |
| 2.2.3 | <i>Flowchart Controller</i> BLDC | 30 |
| 2.3 | Hipotesis Penelitian | 32 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | | 33 |
| 3.1 | Tujuan Operasional Penelitian..... | 33 |
| 3.2 | Tempat dan Waktu Penelitian..... | 33 |
| 3.3 | Metode Penelitian | 33 |
| 3.3.1 | Mengumpulkan informasi | 34 |
| 3.3.2 | Desain Produk | 35 |
| 3.3.2.1 | Rancangan Maket Prototipe Mobil Listrik..... | 35 |

| | | |
|----------------------------------|--|----|
| 3.3.2.2 | Rancangan Sistem Kelistrikan Prototipe Mobil Listrik Si-Sirung..... | 39 |
| 3.3.4 | Instrumen Penelitian..... | 47 |
| 3.3.5 | Uji Coba Produk..... | 50 |
| 3.3.5.1 | Kriteria Pengukuran <i>Thorottle Control</i> | 50 |
| 3.3.5.2 | Kriteria Pengujian <i>Hall Sensor</i> | 51 |
| 3.3.5.3 | Pengujian Pada Driver Tiga Fasa | 51 |
| 3.3.5.4 | Pengujian Performa Mobil Listrik..... | 52 |
| 3.3.6 | Revisi Produk | 55 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN | | 56 |
| 4.1 | Hasil Penelitian | 56 |
| 4.1.1 | Hasil Pembuatan Maket Mobil Listrik | 56 |
| 4.1.2 | Hasil Pengujian dan Pembahasan..... | 60 |
| 4.1.2.1 | Hasil Pengujian <i>throttle control</i> | 60 |
| 4.1.2.2 | Hasil Pengujian <i>Hall Sensor</i> | 61 |
| 4.1.2.3 | Hasil Pengujian Driver Mosfet..... | 62 |
| 4.1.2.4 | Data Performa Mobil Listrik Tanpa Beban..... | 62 |
| 4.1.2.5 | Data Performa Mobil Listrik dengan Beban Pada Satu Putaran Lintasan 800 meter | 64 |
| 4.2 | Pembahasan..... | 67 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 69 |
| 5.1 | Kesimpulan | 69 |
| 5.2 | Saran | 69 |

| | |
|----------------------|----|
| DAFTAR PUSTAKA | 70 |
| LAMPIRAN..... | 71 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Thomas Edison dan mobil listriknya tahun 1913..... | 7 |
| Gambar 2. 2 Diagram mobil listrik yang umum | 9 |
| Gambar 2. 3 Blok diagram mobil listrik yang kompleks..... | 10 |
| Gambar 2. 4 Brushless Direct Current Motor..... | 11 |
| Gambar 2. 5 Blok diagram Pengendalian BLDC motor | 13 |
| Gambar 2. 6 Diagram Hall Sensor | 16 |
| Gambar 2. 7 Rangkaian Umum Driver Tiga Fasa | 17 |
| Gambar 2. 8 Arduino Nano..... | 19 |
| Gambar 2. 9 Jendela IDE Arduino 1.0.5 r2 | 21 |
| Gambar 2. 10 Bagian <i>Tool Bar</i> | 22 |
| Gambar 2. 11 Bagian Program..... | 23 |
| Gambar 2. 12 Jendela Pesan (Sumber: Diolah Peneliti) | 24 |
| Gambar 2. 13 Baterai | 25 |
| Gambar 2. 14 Blok Diagram Prototipe Mobil Listrik..... | 28 |
| Gambar 2. 15 Diagram Blok <i>Controller</i> BLDC Motor | 29 |
| Gambar 2. 16 <i>Flowchart Controller</i> BLDC 1 | 30 |
| Gambar 2. 17 <i>Flowchart Controller</i> BLDC 2 | 31 |
| Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian | 34 |
| Gambar 3. 2 Perancangan Rangka mobil listrik Si-Sirung..... | 36 |
| Gambar 3. 3 Rancangan <i>Steering</i> | 37 |
| Gambar 3. 4 Rancangan Dudukan Motor | 38 |
| Gambar 3. 5 Rancangan Kendaraan..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Gambar 3. 6 Desain Bodi | 39 |
| Gambar 3. 7 Rancangan Sistem Kelistrikan | 40 |
| Gambar 3. 8 Rangkaian Driver Mosfet Tiga Fasa | 41 |
| Gambar 3. 9 Rangkaian Driver Gate Mosfet | 42 |
| Gambar 3. 10 Rangkaian Hall Sensor | 43 |
| Gambar 3. 11 Rangkaian Sistem Minimum ATmega 328..... | 44 |
| Gambar 3. 12 Rangkaian Regulator Tegangan | 45 |
| Gambar 3. 13 Layout Sistem Kendali | 45 |
| Gambar 3. 14 Layout Driver Mosfet Tiga Fasa | 46 |
| Gambar 3. 15 Skema Pengujian Mobil Listrik | 53 |
| Gambar 4.1 Realisasi Rangka | 56 |
| Gambar 4. 2 Realisasi Sistem Kemudi | 57 |
| Gambar 4. 3 Kontroller BLDC Motor | 57 |
| Gambar 4. 4 Inverter Mosfet Tiga Fasa | 58 |
| Gambar 4. 5 casing Kontroller | 58 |
| Gambar 4. 6 Realisasi Sistem Penggerak pada Prototipe Mobil Listrik | 59 |
| Gambar 4.7 Realisasi Bodi Mobil..... | 59 |
| Gambar 4. 8 Peta Jalan Satu Putaran Track..... | 65 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2. 1 Ketentuan Pengendalian BLDC Motor..... | 15 |
| Tabel 2. 2 Tabel pengaktifan Inverter tiga Fasa..... | 17 |
| Tabel 2. 3 Spesifikasi Arduino Nano..... | 19 |
| Tabel 3. 1 Penggunaan Pin Input pada ATmega328..... | 46 |
| Tabel 3. 2 Penggunaan Pin <i>Output</i> Pada Atmega328..... | 47 |
| Tabel 3. 3 kriteria pengujian <i>throttle control</i> | 50 |
| Tabel 3. 4 Pengujian Hall Sensor..... | 51 |
| Tabel 3. 5 kriteria pengujian driver mosfet..... | 52 |
| Tabel 3. 6 Pengujian data performa mobil listrik berdasarkan kondisi jalan..... | 54 |
| Tabel 3. 7 Pengujian data performa mobil listrik pada satu putaran track..... | 55 |
| Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran <i>Throttle Control</i> | 60 |
| Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Performa Mobil Listrik Tanpa Beban..... | 63 |
| Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Performa Mobil Listrik pada Satu Putaran Track dengan Jarak 800 meter..... | 66 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|----|
| Lampiran 1 Program Kontroller..... | 71 |
| Lampiran 2 Foto-foto Dokumentasi..... | 74 |
| Lampiran 3 Tabel Pengujian Dengan Beban Pada Satu Putaran Lap | 78 |
| Lampiran 4 Algoritma Six Step Comutation | 83 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan energi sudah menjadi permasalahan hampir di seluruh Negara di dunia termasuk di Indonesia. Persediaan bahan bakar sebagai sumber energi yang semakin menipis, menuntut kita untuk berpikir mencari solusi terbaik agar kebutuhan akan hal tersebut dapat terpenuhi. Berbagai Negara telah melakukan upaya untuk menanggulangi krisis tersebut, diantaranya adalah dengan melakukan riset dan penelitian khusus dalam upaya penghematan pemakaian bahan bakar dengan menciptakan alat-alat yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar. Seluruh perusahaan yang bergerak dibidang otomotif pun seolah berlomba untuk menghasilkan produk yang mampu menghemat pemakaian bahan bakar melalui pengembangan teknologinya.

Upaya penghematan bahan bakar dapat dilakukan dengan memodifikasi atau membuat teknologi baru. Upaya ini dapat dilakukan bersama oleh seluruh pihak yang berkepentingan demi menjawab tantangan dibidang energi. Masyarakat harus memiliki kesadaran bahwa di masa yang akan datang diperlukan sebuah solusi bersama untuk masalah ini. Mahasiswa sebagai agen perubahan hendaknya juga dapat turut berpartisipasi aktif dalam upaya penanggulangan krisis energi yang telah melanda dunia termasuk Indonesia melalui aksi nyata yang diwujudkan dalam sebuah kreativitas demi menjawab tantangan energi masa depan di mana seluruh alat transportasi yang digunakan haruslah hemat bahan bakar dan ramah lingkungan tentunya.

Dalam usaha memenuhi tujuan tersebut, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (Ditjen Dikti) menyelenggaraan Lomba terkait mobil hemat energi yaitu “Indonesia Energy Marathon Challenge” (IEMC) pada tahun 2012, 2013 dan 2014 di Surabaya dan lomba Kontes Mobil Hemat Energi pada tahun 2015 yang di selenggarakan di Malang, perlombaan ini selanjutnya akan rutin dilaksanakan setiap tahun. Kendaraan yang diperlombakan terdiri dari dua kelas kendaraan yaitu jenis prototipe dan jenis *urban concept*, sementara dari jenis sumber energi yang dipakai terdiri dari tiga kelas yaitu bensin, etanol dan listrik.

Rancangan mobil hemat energi yang diajukan akan diuji oleh para ahli dari perguruan tinggi, instansi pemerintahan dan perusahaan swasta. Lomba ini memiliki tujuan untuk dapat mempercepat penguasaan teknologi otomotif terbaru di Indonesia sehingga akan muncul teknologi-teknologi terbaru dibidang otomotif yang nantinya akan dapat digunakan untuk menghemat maupun menggunakan bahan bakar alternatif. Selain itu juga diharapkan dengan adanya lomba kendaraan irit bahan bakar di Indonesia, nantinya wakil-wakil Indonesia akan bisa berbicara banyak di lomba Internasional dalam lomba sejenis. Hal ini berguna untuk mengangkat citra bangsa Indonesia di mata dunia internasional.

Tidak hanya di tingkat nasional, perlombaan mobil hemat energi juga dilaksanakan di tingkat Asia yaitu ajang perlombaan *Shell Eco Marathon Asia* yang telah dilaksanakan selama lima tahun ke belakang. Perlombaan ini telah di ikuti oleh beberapa negara di Asia diantaranya Thailand, Singapore, Malaysia, Filipina dan indonesia. Pada kelas listrik di tahun 2015, juara pertama dan kedua di duduki oleh Thailand dengan perolehan hasil race sebesar 451.3 Km/Kwh dan 368 Km/KWh, juara ke tiga dan ke empat di duduki oleh Singapore dengan perolehan

hasil race sebesar 324 Km/KWh dan 218 Km/KWh, sementara indonesia menduduki peringkat ke lima yang diwakili oleh Universitas Brawijaya dengan perolehan hasil race sebesar 205 Km/KWh.

Pada ajang perlombaan Kontes Mobil Hemat Energi ini, penggunaan mobil listrik dirasa sangat efektif, selain tidak menimbulkan polusi udara, memiliki konstruksi mesin yang lebih sederhana juga memiliki kelebihan diantaranya:

- Meningkatkan efisiensi energi.
- Memanfaatkan sumber energi terbaru/energi alternatif .
- Mengurangi pencemaran lingkungan.
- Memberdayakan berbagai sumber daya di Indonesia untuk meneliti, mengembangkan, memproduksi dan memanfaatkan kendaraan massal berbasis listrik.

Kendaraan listrik memiliki tingkat efisiensi yang paling tinggi dibandingkan dengan kendaraan mesin bakar konvensional. Pada mesin bakar sebagian besar dari energi yang dihasilkan terbuang menjadi energi panas, gerak dan gesekan komponen dan hanya sebagian kecil yang dapat dikonversikan menjadi energi kinetik penggerak kendaraan. Sedangkan pada kendaraan listrik yang terjadi kebalikannya dimana sebagian besar energi dikonversikan menjadi energi kinetik penggerak kendaraan. Sehingga untuk menggerakkan kendaraan dengan bobot yang sama, kendaraan listrik memerlukan energi yang lebih sedikit.

Mobil listrik memiliki konstruksi mesin yang sangat sederhana yang terdiri dari baterai, kontroller dan motor penggerak. Motor yang dibutuhkan yaitu motor yang memiliki efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan, serta ditunjang oleh biaya perawatan yang rendah. Demi memenuhi

kebutuhan tersebut maka digunakan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) motor.

Mengacu pada permasalahan diatas maka dalam skripsi ini peneliti akan merancang sebuah Prototipe Mobil Listrik Universitas Negeri Jakarta Menggunakan BLDC Motor 350 Watt.

1.2 Identifikasi Masalah

Dari uraian latar belakang di atas maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang prototipe mobil listrik yang hemat energi?
2. Bagaimana merancang sistem penggerak prototipe mobil listrik yang memiliki efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan, serta ditunjang oleh biaya perawatan yang rendah?
3. Bagaimana merancang sistem penggerak prototipe mobil listrik dengan memanfaatkan *Brushless* DC (BLDC) motor?
4. Bagaimana menguji efektifitas penggunaan daya pada prototipe mobil listrik?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas peneliti membatasi penelitian pada:

1. Mobil listrik yang di rancang adalah mobil listrik jenis prototipe.
2. Pengerak yang digunakan adalah Motor jenis Brushless atau disebut dengan BLDC Motor yang mempunyai daya maksimum 350 Watt dengan sumber energi dari baterai.

3. Parameter-parameter yang diamati pada penelitian ini hanya pada dinamika motor listrik berupa arus, tegangan, daya input dan jarak tempuh/Watt hour.

1.4 Perumusan Masalah

Bagaimana merancang, membuat dan menguji prototipe mobil listrik yang mampu menempuh jarak 300 meter/Wh dengan menggunakan BLDC motor dengan daya maksimal 350 watt?.

1.5 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan masalah yang telah dirumuskan dan diidentifikasi, maka tujuan dari penelitian ini adalah Merancang prototipe mobil listrik yang mampu menempuh jarak 300 meter/Wh.

1.6 Manfaat Penelitian

Secara umum penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumbangan pemikiran bagi ilmu pengetahuan dan dapat memberikan informasi kepada masyarakat tentang mobil listrik sekaligus dapat menjadi referensi bagi penelitian berikutnya maupun pengembangan lebih lanjut terkait mobil listrik khususnya di Universitas Negeri Jakarta.

BAB II

KERANGKA TEORETIK, KERANGKA BERPIKIR DAN HIPOTESIS PENELITIAN

2.1 Kerangka Teoretik

2.1.1 Mobil Listrik

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik DC, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi (Wikipedia, 2015). 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.

2.1.1.1. Sejarah Mobil Listrik

Mobil listrik populer pada pertengahan abad ke-19 dan awal abad ke-20, ketika listrik masih dipilih sebagai penggerak utama pada kendaraan. Hal ini disebabkan karena mobil listrik menawarkan kenyamanan dan pengoperasian yang mudah dan tidak dapat dicapai oleh kendaraan-kendaraan berbahan bakar bensin. Perkembangan teknologi dalam pembakaran yang semakin maju, terutama di Power yang mengurangi popularitas mobil listrik. Hal ini ditambah dengan kemampuan mobil bensin dapat menempuh jarak yang lebih jauh, pengisian bensin yang lebih cepat, dan infrastruktur pengisian semakin bertambah, ditambah dengan sistem produksi massal yang diterapkan oleh Ford Motor Company, membuat harga

mobil bensin turun drastis sampai setengah harga mobil listrik. Mobil listrik juga menjadi semakin tidak populer, dan secara total menghilang, terutama di pasar ilegal seperti Amerika Serikat, pada tahun 1930-an. tetapi pada tahun sekarang ini, semakin banyak orang yang sadar akan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh mobil berbahan bakar bensin, ditambah harga bensin yang mahal dan terus naik, membuat mobil listrik kembali diminati. Mobil listrik jauh lebih ramah lingkungan dari mobil bensin, biaya perawatan lebih murah, ditambah teknologi baterai yang semakin maju. Kekurangannya adalah harga mobil listrik saat ini masih belum terjangkau dalam kalangan menengah kebawah. Mobil listrik saat ini mulai mendapatkan lagi popularitasnya di beberapa negara di dunia setelah sekian lama menghilang. Berikut adalah contoh mobil listrik yang dirancang oleh Thomas Edison pada tahun 1913 dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1 Thomas Edison dan mobil listriknya tahun 1913

(sumber : http://wikipedia.org/wiki/Mobil_Listrik, diakses terakhir tanggal 27 November 2015)

2.1.1.2. Perkembangan Mobil Listrik

Perusahaan otomotif asal California, Tesla Motors, memulai pengembangan Tesla Roadster pada tahun 2004, dan kemudian diluncurkan ke publik pada tahun 2008. Sampai bulan Januari 2011, Tesla telah berhasil menjual 1.500 Unit Roadster di 31 negara. Mitsubishi i Miev diluncurkan untuk penggunaan armada di Jepang bulan Juli 2009, dan mulai dijual pada perseorangan pada bulan April 2010. I Miev mulai dijual di Hong Kong bulan Mei 2010, dan Australia mulai Juli 2010. Penjualan Nissan Leaf di Jepang dan Amerika Serikat dimulai pada bulan Desember 2010, meskipun di awal peluncurannya hanya tersedia di beberapa kawasan saja dengan jumlah yang terbatas pula. Sampai bulan September 2011, mobil-mobil listrik yang dijual di pasaran adalah REVAi, Buddy, Citroën C1 ev'ie, Transit Connect Electric, Mercedes-Benz Vito E-Cell, Smart ED, dan Wheego Whip LiFe.

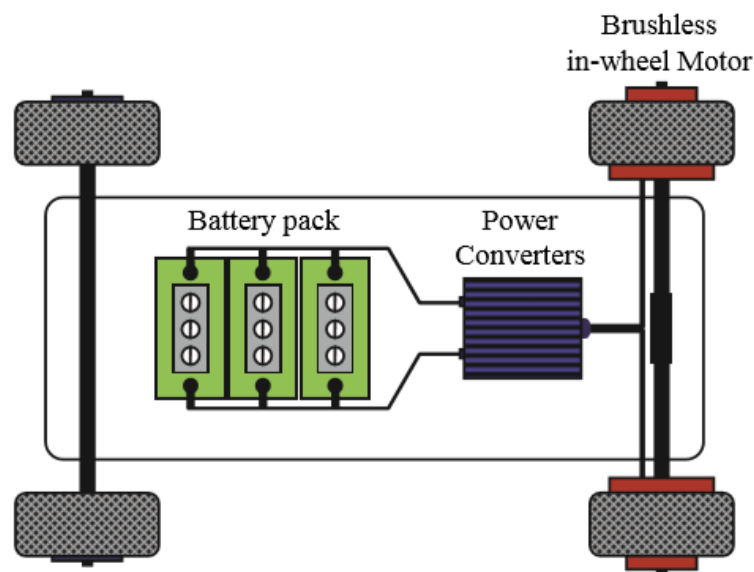
Sampai pada awal tahun 2012, jumlah kendaraan listrik yang diproduksi massal yang tersedia di dunia masih terbatas. Kebanyakan mobil listrik yang tersedia saat ini adalah kendaraan listrik jarak dekat (Neighborhood Electric Vehicle, NEV). Pike Research mengestimasi ada sekitar 479.000 NEV di dunia saat ini. Kendaraan NEV yang paling laris adalah Global Electric Motorcars (GEM), yang sampai bulan Desember 2010 telah terjual lebih dari 45.000 unit sejak pertama dijual tahun 1998. Dua pasar NEV terbesar di dunia pada tahun 2011 adalah Amerika Serikat (14.727 unit) dan Perancis (2.231 unit). Produsen Nissan, hingga April 2012 telah menjual mobil listrik Nissan Leaf sebanyak 27.000 unit, sedang Mitsubishi I-MiEV telah laku 17.000 unit hingga Oktober 2011. Perusahaan

mobil di California, Tesla Motors, telah menjual 1500 unit Tesla Roadster sejak peluncurannya tahun 2008 hingga pertengahan 2011 (Purwadi, 2015, hlm. 5).

2.1.1.3. Blok Diagram Mobil Listrik Pada Umumnya

Pada umumnya mobil listrik hanya terdiri dari beberapa komponen utama yaitu baterai, konverter/kendali motor dan motor elektrik yang dapat dilihat pada

Gambar 2.2.

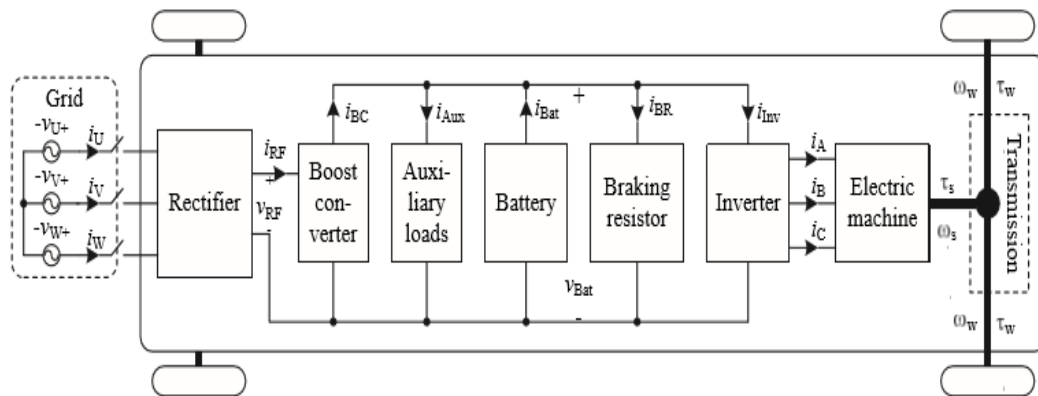


Gambar 2. 2 Diagram mobil listrik yang umum

(Sumber: Driss Yousfi, 2011, hlm. 201)

2.1.1.4. Blok Diagram Mobil Listrik Yang Kompleks

Banyak arsitektur yang berbeda dari sebuah kendaraan listrik karena ada banyak kemungkinan, misalnya, 1 sampai 4 mesin listrik, DC atau AC mesin, gearbox / tidak ada gearbox, tegangan baterai tinggi atau rendah, satu atau tiga fase pengisian, dan lain-lain. Untuk blok diagram mobil listrik yang kompleks dapat dilihat pada **Gambar 2.3.**



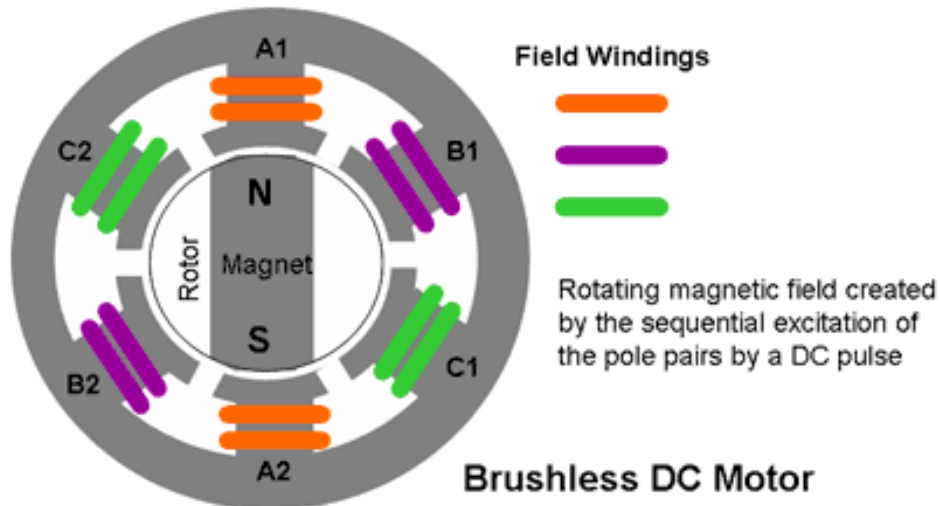
Gambar 2.3 Blok diagram mobil listrik yang kompleks

(Sumber: Schaltz, 2011, hlm.1)

2.1.2 BLDC Motor

Menurut Johan Wilberg (2003:11) BLDC motor adalah sebuah motor DC yang ditukar bagian dalam dan luarnya. Dengan kata lain koil berada disisi luar dan magnet ada disisi dalam.

BLDC motor adalah motor DC yang posisi lilitan dan magnet permanen ditukar, yaitu posisi lilitan berada dibagian stator dan posisi magnet permanen berada di rotor. Rotor merupakan bagian yang bergerak dan stator merupakan bagian yang tidak bergerak. BLDC motor dapat digerakkan dengan menggunakan *driver* semikonduktor tiga fasa dan motor membutuhkan sensor posisi rotor untuk memulai dan membuat komutasi berurutan yang tepat untuk menyalakan sumber tenaga pada driver tiga fasa. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 2.4** dibawah ini:



Gambar 2. 4 Brushless Direct Current Motor

(Sumber: <http://www.mpoweruk.com/motorsBrushless.htm>)

Gambar 2.4. di atas menunjukkan bahwa posisi medan magnet berada pada bagian rotor yakni bagian yang akan bergerak dan koil/lilitan berada pada stator yaitu bagian yang tidak bergerak. Lilitan terdiri dari tiga warna yang berbeda yang menjelaskan bahwa masing-masing warna dari lilitan tersebut memiliki fasa yang berbeda yaitu fasa A fasa, B dan fasa C atau sering juga disebut sasa U, fasa V dan fasa W. Oleh karena itu, dibutuhkan *driver/inverter* tiga fasa untuk membangkitkan koil dari setiap fasa pada BLDC.

Abe Dharmawan (2009:5) menyatakan bahwa secara umum BLDC motor terdiri dari dua bagian, yakni rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak, yang terbuat dari magnet permanen dan stator adalah bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan tiga fasa.

Walaupun BLAC merupakan motor listrik *synchronous* AC tiga fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC motor karena pada implementasinya BLAC motor menggunakan sumber DC se sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* tiga fasa. Tujuan dari

pemberian tegangan AC tiga fasa pada stator BLDC motor adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor.

Pendapat lain dikemukakan oleh S. Rambabu (2007:8) menyatakan bahwa BLDC motor diartikan sebagai sebuah mesin tersinkronisasi permanen dengan umpan balik posisi rotor. BLDC motor pada umumnya dikontrol dengan menggunakan tiga fasa rangkaian jembatan semikonduktor. Motor membutuhkan sebuah sensor posisi rotor untuk memulai dan membuat komutasi berurut yang tepat untuk menyalakan sumber tenaga alat pada bagian inverter. Berdasarkan posisi rotor, sumber daya berkomutasi secara berurut setiap 60 derajat.

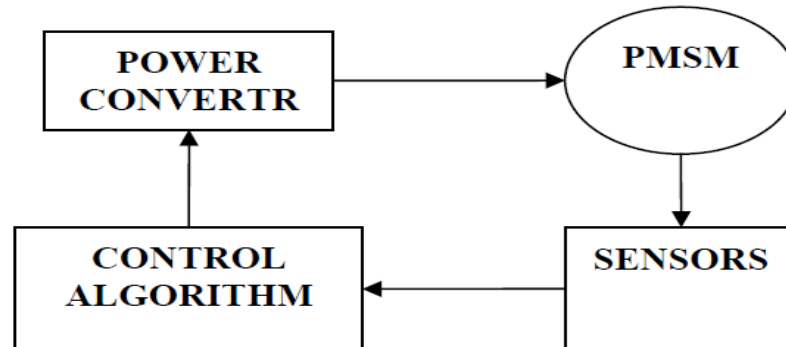
Berdasarkan pendapat para ahli di atas, maka dapat disimpulkan bahwa BLDC motor adalah suatu jenis motor sinkron. Artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet rotor berputar di frekuensi dan kecepatan yang sama. BLDC motor tidak mengalami slip, tidak seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. BLDC Motor merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

Mengingat BLDC motor dapat digerakkan dengan menggunakan *driver* semikonduktor tiga fasa dan motor membutuhkan sensor posisi rotor untuk memulai dan membuat komutasi berurutan yang tepat untuk menyalakan sumber tenaga pada driver tiga fasa tentunya dibutuhkan sistem yang mampu mengontrol komutasi sesuai dengan kebutuhan BLDC tersebut.

2.1.3 Pengendalian BLDC Motor

Menurut Johan Wiberg (2003:12), motor DC yang normal sangat mudah untuk mengontrol kecepatan dan arah. Untuk mengontrol kecepatan hanya cukup

memberikan variasi tegangan input. Untuk mengubah arah, cukup membalik polaritas. Kecepatan sering dikendalikan dengan modulasi lebar pulsa untuk motor DC dan motor *Brushless*. Untuk dapat menjalankan motor *Brushless*, informasi dari sensor posisi sudut dari rotor sangat diperlukan. Blok diagram pengendalian BLDC motor dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 Blok diagram Pengendalian BLDC motor

(Sumber: S. Rambabu, Modeling And Control Of A Brushless DC Motor)

Dasar blok diagram BLDC motor terdiri atas empat komponen utama yaitu; konverter daya, *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) sensor, dan kontrol algoritma (S. Rambabu, 2007:9).

Konverter dapat merubah daya dari sumber ke PMSM yang mana mengubah energi listrik ke energi gerak. Salah satu dari fitur yang paling menarik dari BLDC motor adalah *rotor position sensor*, yaitu sensor yang akan membaca posisi rotor yang nantinya akan dijadikan acuan untuk perintah *timing comutation* pada masing-masing semikonduktor pada *driver* tiga fasa.

Control algorithm berfungsi sebagai pengontrol perubahan komutasi yang harus dilakukan agar BLDC motor berputar. *Control algorithm* akan menerima status posisi rotor terhadap stator yang dikirimkan oleh sensor dan memberikan tindakan berupa output terhadap *power converter*.

Terdapat dua metode dalam pengendalian BLDC yakni metode konvensional atau metode *Pulse Width Modulation (PWM) six step* dan metode *Pulse Width Modulation (PWM) sinusoidal*. Metode PWM *six step* adalah metode pemberian pulsa PWM yang berbentuk gelombang trapezoid namun metode ini banyak digunakan dalam pengendalian BLDC.

Adapun metode yang kedua yaitu metode PWM sinusoidal, yaitu pemberian pulsa PWM berbentuk gelombang sinusoidal murni. Hanya saja metode ini jarang digunakan karena algoritma yang rumit dalam pembangkitan sinyal PWM sinusoidal. Proses pembangkitan PWM sinusoidal dilakukan dengan cara membandingkan sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga yang memiliki frekuensi yang lebih tinggi.

Untuk menggerakkan BLDC motor selain membutuhkan sistem pengendali dibutuhkan juga sumber energi berupa tegangan DC. Sumber tegangan DC dapat diambil dari Power Supply, Generator, panel surya dan baterai. Dalam penelitian ini, peneliti memilih baterai sebagai sumber tegangan DC.

2.1.3.1 Metode PWM *Six-Step Comutation*

Metode PWM *six step* adalah metode pemberian pulsa PWM yang berbentuk gelombang trapezoid namun metode ini banyak digunakan dalam pengendalian BLDC. Pada pengendalian BLDC motor dengan metode *Pulse Width Modulation (PWM) six step* terdapat ketentuan-ketentuan yang harus dipenuhi agar sistem berjalan. Adapun ketentuan-ketentuan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Ketentuan Pengendalian BLDC Motor

| Hall Sensor A | Hall Sensor B | Hall Sensor C | Phase A | Phase B | Phase C |
|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0 | 0 | $-V_{DCB}$ | $+V_{DCB}$ | NC |
| 1 | 0 | 1 | NC | $+V_{DCB}$ | $-V_{DCB}$ |
| 0 | 0 | 1 | $+V_{DCB}$ | NC | $-V_{DCB}$ |
| 0 | 1 | 1 | $+V_{DCB}$ | $-V_{DCB}$ | NC |
| 0 | 1 | 0 | NC | $-V_{DCB}$ | $+V_{DCB}$ |
| 1 | 1 | 0 | $-V_{DCB}$ | NC | $+V_{DCB}$ |

(Sumber: Freescale, 3-Phase BLDC Driver Using Variable DC Link Six-Step Inverter)

Pada **Tabel 2.2** diatas dapat dilihat bahwa setiap fasa yang dibutuhkan untuk menggerakkan BLDC motor bergantung pada kondisi hall sensor yang terdapat pada BLDC motor itu sendiri.

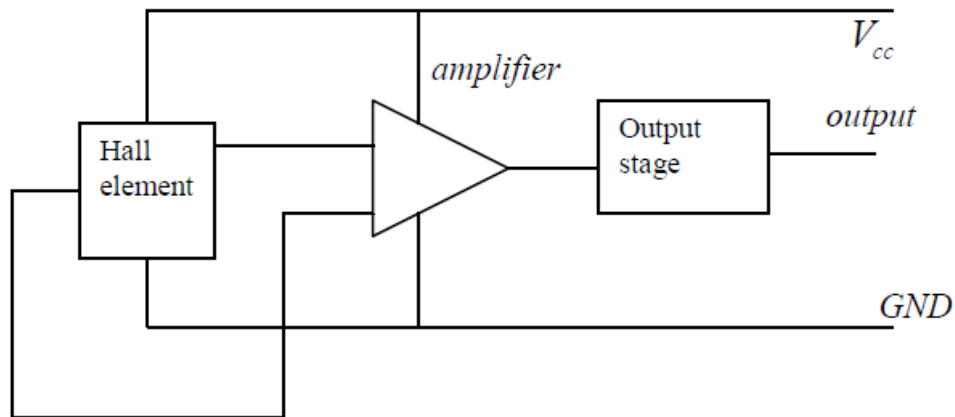
2.1.3.2 Hall Sensor

S. Rambabu (2007:12) menyatakan bahwa:

Hall Effect sensors provide the portion of information need to synchronize the motor excitation with rotor position in order to produce constant torque. It detects the change in magnetic field. The rotor magnets are used as triggers the hall sensors. A signal conditioning circuit integrated with hall switch provides a TTL-compatible pulse with sharp edges. Three hall sensors are placed 120 degree apart are mounted on the stator frame. The hall sensor digital signals are used to sense the rotor position.

Hall sensor memberikan bagian-bagian dari informasi yang dibutuhkan untuk sinkronisasi eksitasi motor dengan posisi rotor untuk membuat torsi yang konstan. Hall sensor ini mendeteksi perubahan di dalam ruang magnet. Magnet magnet pada rotor digunakan sebagai pemicu *hall* sensor. Sirkuit pengkondisian

sinyal diintegrasikan dengan saklar *hall* yang menyediakan pulsa tegangan TTL dengan ujung yang lancip. Tiga *hall* sensor di letakkan berjarak masing-masing 120° yang dipasang di dinding stator. Sinyal-sinyal digital *hall* sensor digunakan untuk membaca posisi rotor. Diagram blok dari *hall* sensor dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.

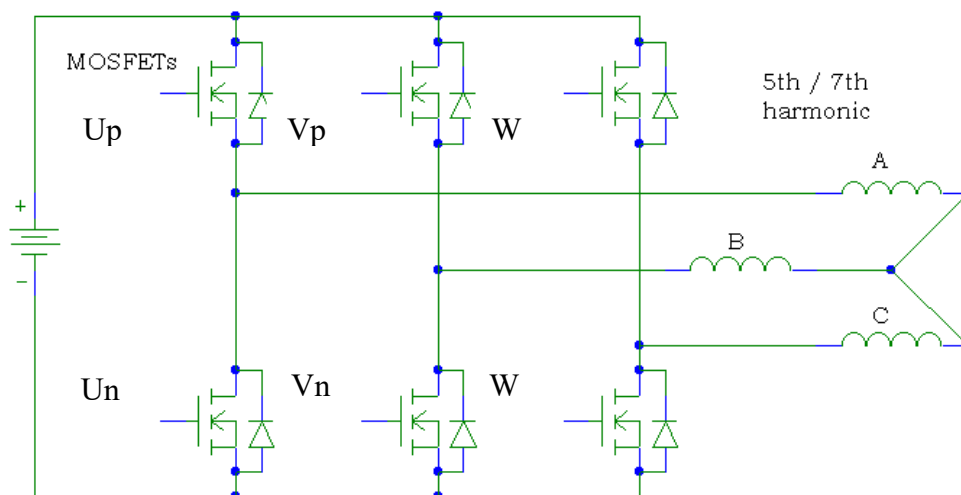


Gambar 2. 6 Diagram Hall Sensor

(Sumber: S. Rambabu, Modeling And Control Of A Brushless DC Motor)

2.1.3.3 Inverter Mosfet Tiga Fasa

Untuk membangkitkan daya/tegangan dari sumber DC pada motor maka diperlukan *driver* tiga fasa yang akan berfungsi mengaktifkan masing-masing koil yang terdapat pada BLDC. Susunan *driver* tiga fasa tersebut dapat dilihat seperti pada **Gambar 2.7** berikut.



Gambar 2. 7 Rangkaian Umum Driver Tiga Fasa

(Sumber: <http://www.ewh.ieee.org/soc/es/May2001/08/FIG17.GIF>)

Driver ini terdiri dari enam transistor MOSFET *N channel* yang tersusun tiga berpasangan yang terdiri dari bagian *High side* atau bagian atas yang diberi symbol (p) dan *low side* atau bagian bawah yang diberi symbol (n). Agar dapat menghasilkan tegangan pada BLDC, masing-masing FET harus diberi sinyal kendali mengikuti urutan pada **Tabel 2.2**. Sinyal kendali yang diberikan berupa sinyal kendali periodik yang dibagi menjadi enam keadaan.

Tabel 2. 2 Tabel pengaktifan Inverter tiga Fasa

| Step # | Phase Up | Phase Vp | Phase Wp | Phase Un | Phase Vn | Phase Wn |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Up | | | | Vn | |
| 2 | Up | | | | | Wn |
| 3 | | Vp | | | | Wn |
| 4 | | Vp | | Un | | |
| 5 | | | Wp | Un | | |
| 6 | | | Wp | | Vn | |

(Sumber: Yashvant Jani, *Implementing Embedded Speed Control for Brushless*

DC Motors Part 1, Renesas Technology America, Inc)

Dari **Tabel 2.3** di atas dapat diuraikan bahwa syarat untuk mengaktifkan BLDC adalah dengan cara mengaktifkan *high side* atau (p) dan *low side* atau (n) dari fasa yang berbeda. seperti pada step pertama ketika fasa U positif dan fasa V negatif maka tegangan akan mengalirdari U ke V dan begitupun pada step selanjutnya.

2.1.3.4 Arduino

Arduino adalah sebuah Platform dari physical computing yang bersifat open source yang didasarkan atas papan masukan/keluaran (I/O) sederhana dan development environment yang mengimplementasikan bahasa pengolahan (Banzi, 2008, hal.1). Adapun definisi dari Arduino yaitu kit elektronik atau papan rangkaian elektronik open source yang di dalamnya terdapat komponen utama, yaitu sebuah chip mikrokontroler dengan jenis AVR dari perusahaan Atmel. Mikrokontroler itu sendiri adalah chip atau IC (integrated circuit) yang bisa diprogram menggunakan komputer.

Saat ini arduino sangat populer di seluruh dunia, banyak pemula yang belajar mengenal robotika dan elektronika lewat arduino karena mudah dipelajari. Bahasa yang dipakai dalam arduino bukan assembler yang relatif sulit, tetapi bahasa C yang disederhanakan dengan bantuan pustaka – pustaka (libraries) arduino. Arduino sendiri memiliki berbagai macam jenis tergantung dari jumlah input atau output yang akan digunakan.

a. Arduino Nano

Mikrokontroler AVR merupakan pengontrol utama standar industri dan riset saat ini. Hal ini dikarenakan berbagai kelebihan yang dimilikinya

dibandingkan mikroprosesor, yaitu murah, dukungan software dan dokumentasi yang memadai, dan memerlukan komponen pendukung yang sangat sedikit (Budiharto, 2008:1). Pada penelitian ini, peneliti menggunakan arduino dengan menggunakan mikrokontroler ATmega328, sehingga dikenali dengan Arduino Nano. Arduino Nano memiliki board yang lebih kecil daripada Arduino lainnya dikarenakan pada bord arduino Nano menggunakan komponen-komponen yang kecil. Berikut Arduino Nano dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 Arduino Nano
(Sumber: www.Arduino.cc)

b. Keterangan Spesifikasi Arduino Nano

Berikut adalah keterangan spesifikasi Arduino Nano dapat dilihat pada

Tabel 2.3:

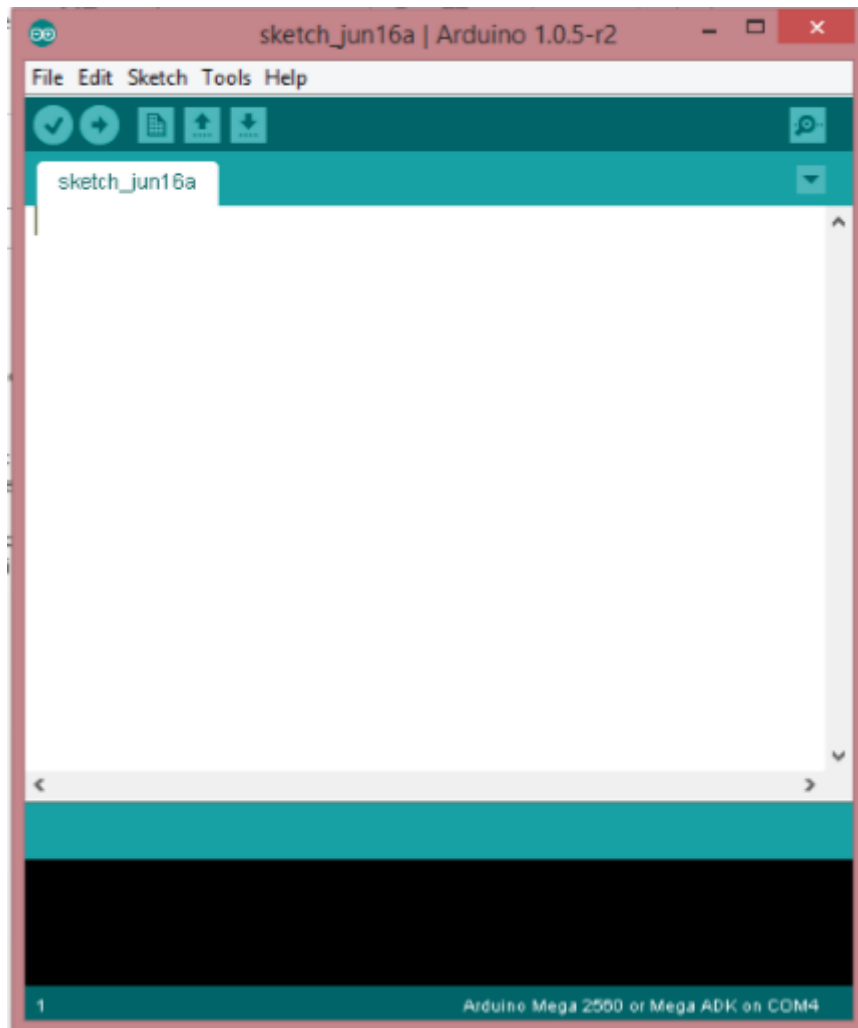
Tabel 2. 3 Spesifikasi Arduino Nano

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Microcontroller | Atmel ATmega168 or ATmega328 |
| Operating Voltage (logic level) | 5 V |
| Input Voltage (recommended) | 7-12 V |
| Input Voltage (limits) | 6-20 V |
| Digital I/O Pins | 14 (of which 6 provide PWM output) |

| | |
|------------------------|---|
| Analog Input Pins | 8 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| Flash Memory | 16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader |
| SRAM | 1 KB (ATmega168) or 2 KB (ATmega328) |
| EEPROM | 512 bytes (ATmega168) or 1 KB (ATmega328) |
| Clock Speed | 16 MHz |
| Dimensions | 0.73" x 1.70" |
| Length | 45 mm |
| Width | 18 mm |
| Weigth | 5 g |

c. *Software Arduino IDE*

Software ini digunakan untuk menulis program pada board arduino. IDE (Integrated Development Environment) adalah software yang sangat berperan untuk menulis program, meng-compile menjadi kode biner dan mengupload ke dalam memori mikrokontroler. Berikut tampilan Software IDE Arduino pada **Gambar 2.9.**

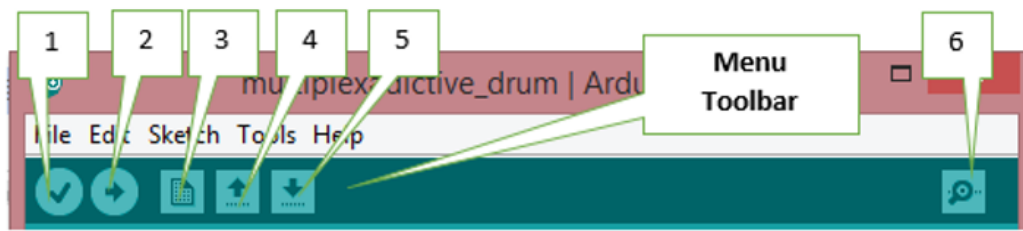


Gambar 2. 9 Jendela IDE Arduino 1.0.5 r2
(Sumber: Diolah Peneliti)

Software IDE Arduino adalah software yang ditulis dengan menggunakan java. Jendela utama IDE Arduino terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

Bagian atas, yakni toolbar, pada bagian atas juga terdapat menu file, edit, sketch, tools, dan help.

Penjelasan bagian-bagian toolbar:



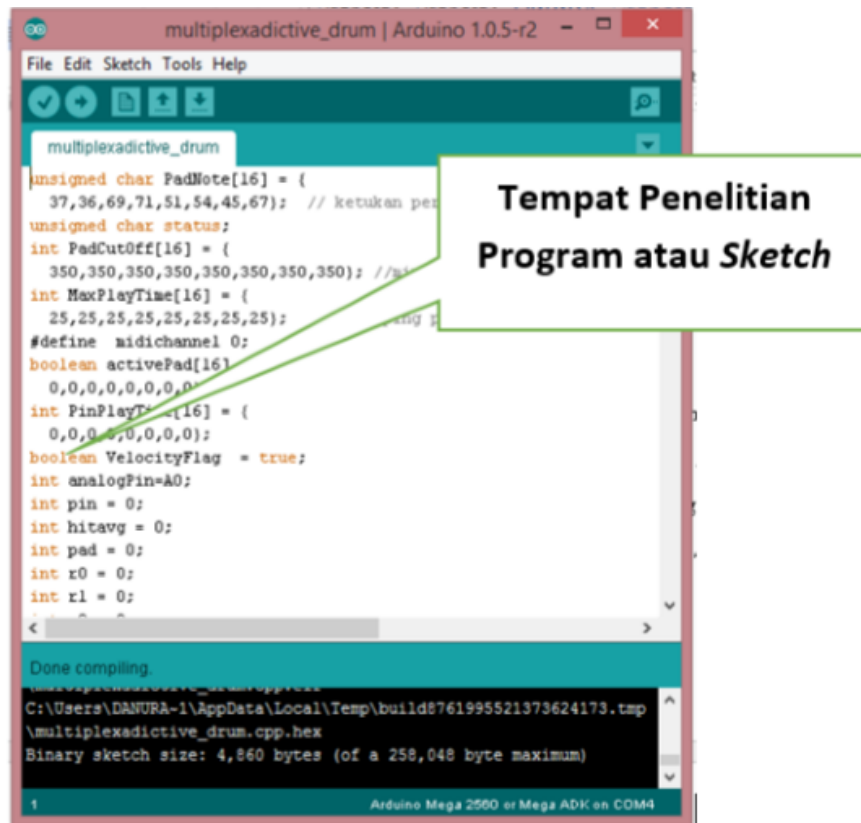
Gambar 2. 10 Bagian *Tool Bar*

(Sumber: Diolah Peneliti)

Keterangan pada Gambar 2. :

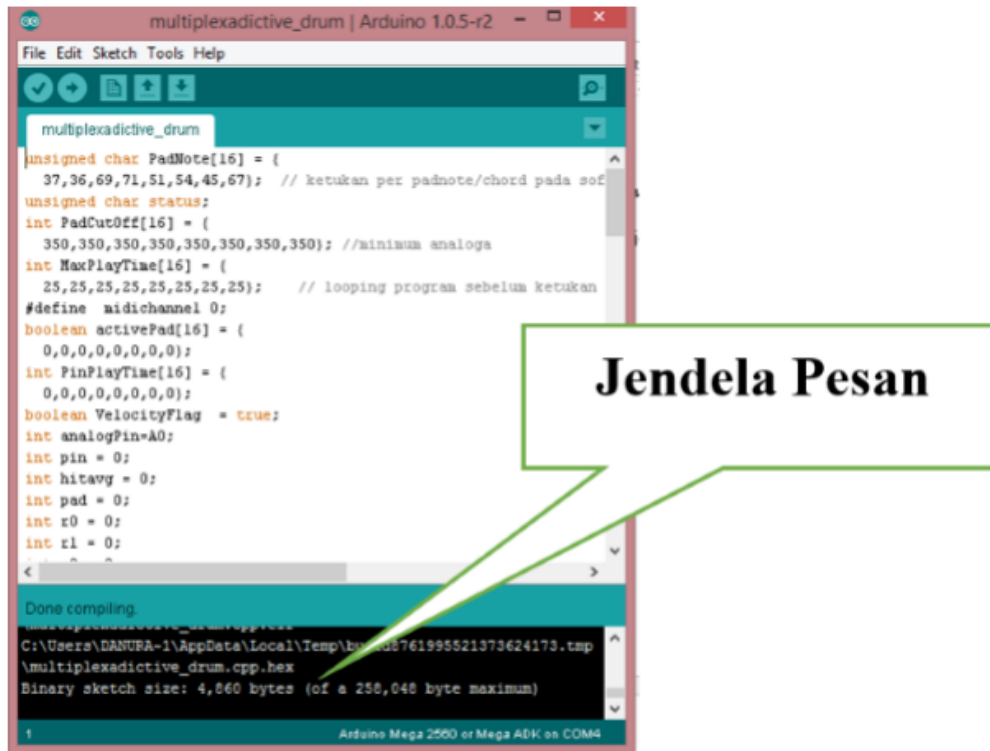
1. Verify : Mengecek kode sketch yang error yang meng-upload ke Board Arduino.
2. Upload : Meng-upload sketch pada board Arduino.
3. New : Membuat sebuah sketch baru.
4. Open : Membuka daftar sketch pada sketchbook untuk dibuka.
5. Save : Menyimpan kode atau sketch pada sketchbook.
6. Serial Monitor : Menampilkan data serial yang dikirimkan dari Arduino.

Penjelasan Bagian Program dapat dilihat Pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2. 11 Bagian Program
(Sumber: Diolah Peneliti)

- Bagian tengah, yaitu tempat penelitian kode program atau sketch
- Bagian bawah berupa jendela pesan (message windows) atau tes konsul yang berisi status dan pesan error. Untuk lebih jelas, lihat pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2. 12 Jendela Pesan

(Sumber: Diolah Peneliti)

2.1.4 Baterai

Baterai merupakan bagian yang cukup vital pada kendaraan listrik dalam hal menyimpan energi listrik untuk dapat digunakan sebagai daya penggerak motor dan kontrolnya. Baterai merupakan sumber energi elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Adapun komponen dari baterai terdiri dari dua elektroda yaitu elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) yang dipisahkan oleh separator dan cairan elektrolit. Cairan elektrolit berfungsi sebagai media transfer elektron dan sebagai pengisolasi elektron

Menurut Zulmain (2009:19), baterai adalah suatu proses kimia listrik, dimana pada saat pengisian/*charge* energi listrik diubah menjadi kimia dan saat

pengeluaran/*discharge* energi kimia diubah menjadi energi listrik (ketika baterai tersebut memberikan arus).

Menurut Tom Delton (1995:110) Baterai memiliki sejumlah persyaratan penting diantaranya:

1. Dapat menyediakan cukup untuk mengoperasikan kendaraan bermotor.
2. Untuk memungkinkan penggunaan lampu parkir dalam waktu yang wajar.
3. Untuk memungkinkan operasi aksesoris saat mesin tidak berjalan.
4. Untuk bertindak sebagai rawa untuk meredam fluktuasi tegangan sistem.
5. Untuk memungkinkan memori dan alarm sistem dinamis untuk tetap aktif saat kendaraan yang tersisa dalam jangka waktu.

Dua pertama dari daftar di atas adalah bisa dibilang yang paling penting dan merupakan bagian utama dari kriteria yang digunakan untuk menentukan baterai yang paling cocok untuk aplikasi tertentu. Berikut adalah contoh baterai dapat dilihat pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2. 13 Baterai

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Baterai yang digunakan tentunya harus mempertimbangkan efektifitasnya terhadap beban diantaranya mempertimbangkan kapasitas baterai yang digunakan.

Kapasitas baterai sangat berpengaruh dalam memberikan *supply* daya yang dibutuhkan sebuah beban.

2.1.5 Daya

Daya Listrik atau dalam bahasa Inggris disebut dengan *Electrical Power* adalah jumlah energi yang diserap atau dihasilkan dalam sebuah sirkuit/rangkaian. Sumber Energi seperti Tegangan listrik akan menghasilkan daya listrik sedangkan beban yang terhubung dengannya akan menyerap daya listrik tersebut. Dengan kata lain, Daya listrik adalah tingkat konsumsi energi dalam sebuah sirkuit atau rangkaian listrik. Sedangkan berdasarkan konsep usaha, yang dimaksud dengan daya listrik adalah besarnya usaha dalam memindahkan muatan per satuan waktu.

Dalam mode matematika, daya listrik dapat dirumuskan:

$$P = i \times V$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

I = Arus (Amper)

V = tegangan (volt)

2.1.6 Prototipe Mobil Listrik

Prototipe adalah model yang mula-mula (model asli) yang menjadi contoh (kbbi.web.id/prototipe). Mobil adalah kendaraan darat yang digerakkan oleh tenaga mesin (kbbi.web.id/mobil), dan listrik adalah daya atau kekuatan yang ditimbulkan oleh adanya gesekan atau melalui proses kimia, dapat digunakan untuk menghasilkan panas atau cahaya, atau untuk menjalankan mesin

(kbbi.web.id/listrik), sedangkan kelistrikan adalah gejala alam yang timbul dari polaritas dua garis elementer, yakni proton yang bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif (kbbi.web.id/kelistrikan).

Prototipe mobil listrik adalah model kendaraan yang digerakkan oleh tenaga mesin dengan sumber energi berupa listrik yang menjadi contoh untuk model aslinya. Prototipe mobil listrik tentunya membutuhkan penggerak yang memanfaatkan sumber energi listrik menjadi energi mekanik (putar), penggerak tersebut yaitu berupa motor DC (Direct Current) atau BLDC (Brushless Direct Current) motor. dalam perancangan prototipe mobil listrik yang akan diberi nama “Si-Sirung”, peneliti menggunakan BLDC motor sebagai penggerak utama dan baterai sebagai sumber energi.

2.2 Kerangka Berpikir

Dengan landasan teori yang telah ditulis pada halaman sebelumnya, pada prototipe mobil listrik menggunakan BLDC motor 350 wat dapat diketahui rancangan yang dibuat menggunakan BLDC motor yang mempunyai daya maksimal 350 wat yang digunakan sebagai sistem penggerak utama yang dikendalikan menggunakan *controller* sebagai pengatur kecepatan putar motor.

Untuk dapat memahami sistem pada prototipe mobil listrik dahulu menentukan jenis-jenis komponen pendukung yang dibutuhkan dalam pembuatan sistem. Adapun tahapan-tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

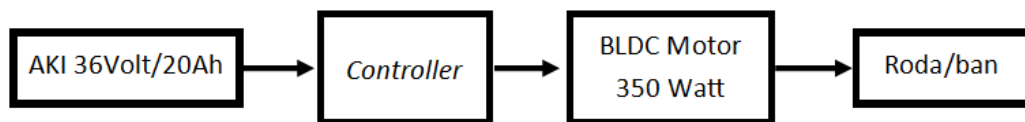
1. Mendesain prototipe mobil listrik menggunakan BLDC motor 350 Wat dengan sistem penggerak menggunakan baterai 36Volt/20Ah sebagai sumber tegangan, Arduino Nano sebagai pengontrol algoritma yang mampu

memberikan nilai komutasi yang sesuai dalam pengendalian BLDC motor dan driver mosfet tiga fasa sebagai konverter daya yang mampu membangkitkan daya dari baterai menuju motor sehingga motor dapat berputar.

2. Merealisasikan sistem penggerak BLDC motor agar dapat diterapkan pada prototipe mobil listrik.
3. Menguji prototipe mobil listrik yang telah direalisasikan.

2.2.1 Blok Diagram Prototipe Mobil Listrik dengan BLDC Motor 350 Wat

Sebelum membuat prototipe mobil listrik menggunakan BLDC motor 350 Watt, terlebih dahulu merancang susunan keseluruhan sistem. Rancangan dapat dilihat pada **Gambar 2.14**.



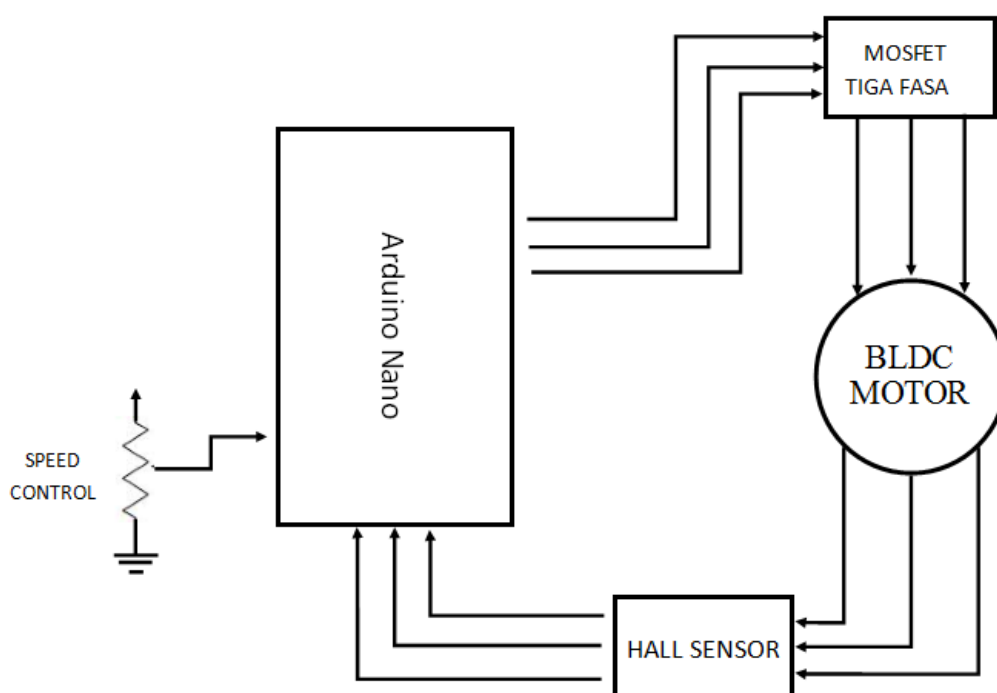
Gambar 2. 14 Blok Diagram Prototipe Mobil Listrik

(Sumber: Dirancang Peneliti)

Gambar 2.9 merupakan rancangan blok diagram dari prototipe mobil listrik menggunakan BLDC motor 350 Wat yang menjadi penggerak utama roda/ban. BLDC motor digerakkan oleh *controller* dengan sumber tegangan berupa aki dengan kapasitas 20Ah dan tegangan kerja 36Volt. Adapun fungsi dari *controller* adalah merubah tegangan *Direct curent* (DC) Menjadi *Alternative Curent* dengan metode PWM *Six-Step* seperti yang telah dijelaskan pada halaman sebelumnya.

2.2.2 Blok Diagram *Controller* BLDC Motor

Pada diagram blok prototipe mobil listrik diatas terdapat *controller* yang digunakan sebagai pengendali putaran BLDC motor. Sesuai dengan landasan teori yang telah dibahas pada halaman sebelumnya maka rancangan dari *controller* BLDC motor ini dirancang menggunakan Arduino uno sebagai pengontrol algoritma dan driver mosfet tiga fasa sebagai monverter daya Adapun rancangan blok diagram dari sistem *controller* tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.15**.



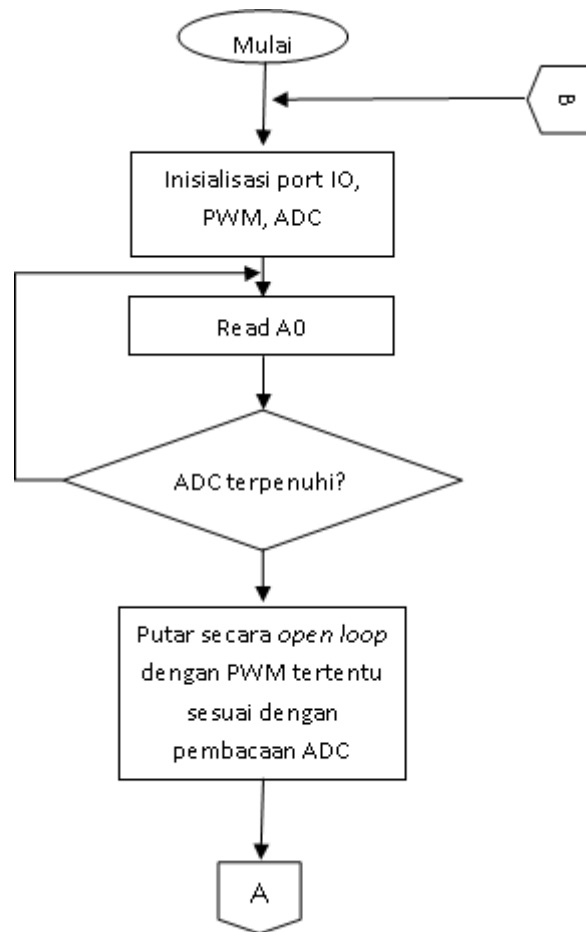
Gambar 2. 15 Diagram Blok *Controller* BLDC Motor

(Sumber: Dirancang Peneliti)

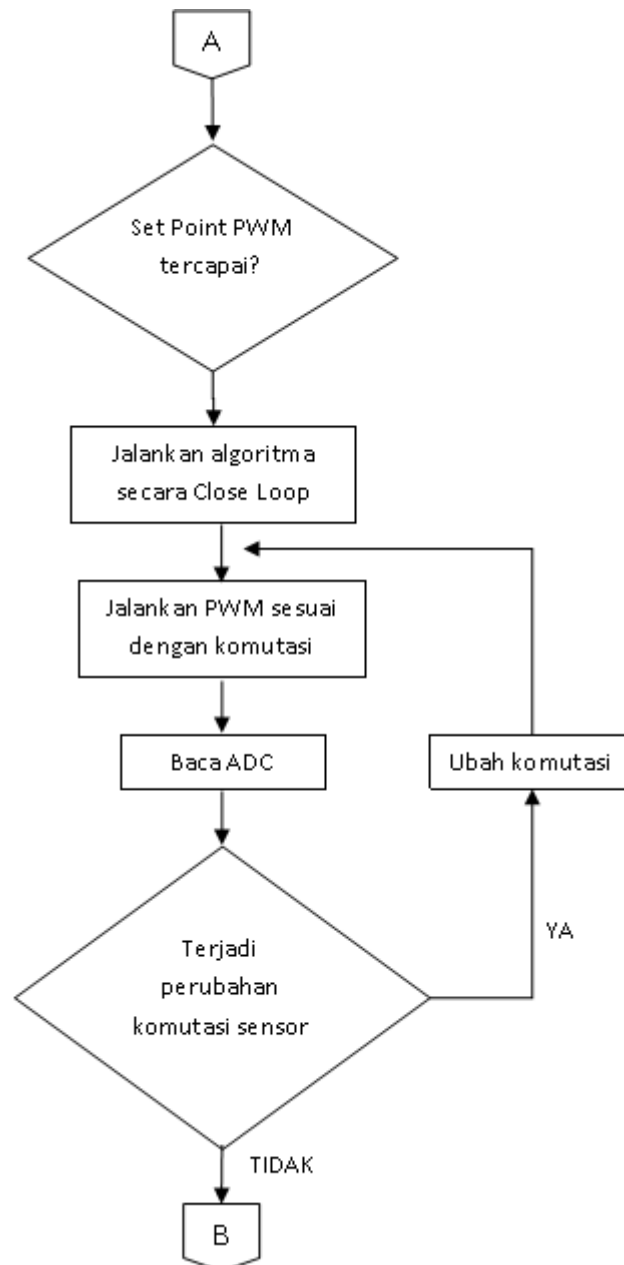
Dari **Gambar 2.10** diatas, Arduino Nano berfungsi sebagai pengontrol algoritma yang akan memberikan aksi berupa output ketika menerima inputan dari *hall sensor* dan *speed control*. Ketika arduino telah menerima input dari pengontrol kecepatan dan *hall sensor* maka selanjutnya arduino akan mengeluarkan output yang akan di kirimkan kepada driver mosfet tiga fasa yang berfungsi sebagai

pembangkit daya yang akan membangkitkan tegangan menuju motor. *Hall sensor* akan membaca posisi rotor terhadap stator yang selanjutnya akan di umpan balik kembali kepada arduino untuk dijadikan nilai referensi komutasi selanjutnya.

2.2.3 Flowchart Controller BLDC



Gambar 2.16 Flowchart Controller BLDC 1
(Sumber: Dirancang Peneliti)



Gambar 2.17 Flowchart Controller BLDC 2

(Sumber: Dirancang Peneliti)

Pada **Gambar 2.17** Flowchart Controller BLDC 1, yang pertama dilakukan pada saat menjalankan sistem yaitu menginisialisasi pin I/O untuk menentukan masukan dan keluaran dari keseluruhan sistem.

Setelah inisialisasi selesai, tahapan selanjutnya adalah pembacaan nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) yang masuk ke dalam sistem. Fungsi dari

pembacaan ADC ini adalah untuk menentukan kecepatan putaran motor yang akan dikeluarkan oleh sistem. Pembacaan ADC ini akan terus berjalan dan berputar selama pembacaan ADC belum terpenuhi. Jika nilai ADC yang masuk kedalam sistem sudah terpenuhi maka sistem akan mengeluarkan perintah untuk memutar motor secara *open loop* dengan kecepatan sesuai dengan pembacaan ADC. Pada **Gambar 2.17**, Ketika proses ini berlangsung maka *hall sensor* akan mulai membaca posisi rotor terhadap stator pada motor yang selanjutnya pembacaan tersebut akan dikirim kepada sistem untuk menjalankan komutasi selanjutnya secara *close loop*. Jika komutasi terpenuhi dan *hall sensor* terus membaca perubahan komutasi pada motor maka perubahan komutasi akan terus berjalan, sebaliknya jika *hall sensor* tidak membaca perubahan komutasi pada sistem maka sistem akan kembali kepada inisialisasi pin I/O.

2.3 Hipotesis Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat hipotesis penelitian sebagai berikut: “prototipe mobil listrik diduga dapat menempuh jarak 300 m/Wh dengan menggunakan BLDC motor 350 wat”.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tujuan Operasional Penelitian

Secara operasional penelitian ini bertujuan untuk mendesain, merencanakan dan menguji prototipe mobil listrik menggunakan BLDC motor dengan daya maksimum 350 Watt yang mampu menempuh jarak 300 meter/Watt.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknik Elektro Lantai 4 Ruangan 401, bengkel mekanik Universitas Negeri Jakarta dan Laboratorium SEM-UNJ mulai dari bulan Mei – Desember 2015.

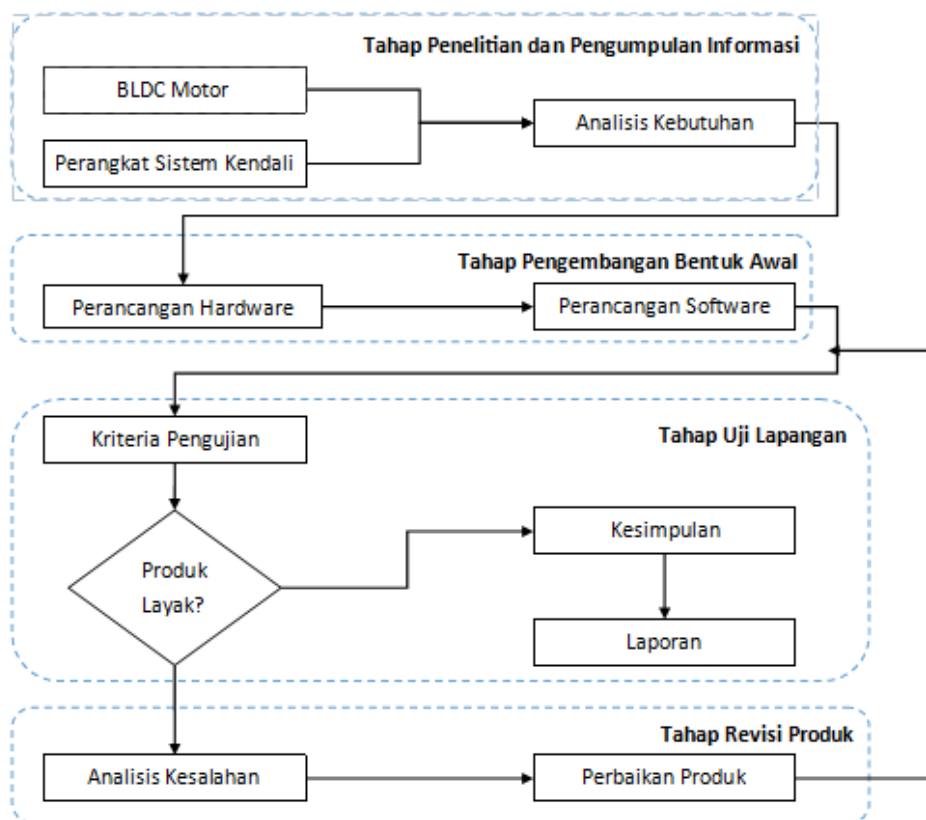
3.3 Metode Penelitian

Metodologi penelitian adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ilmiah yang bertujuan untuk mendapatkan hasil sehingga tujuan dari penelitian tersebut dapat terpenuhi. Metodologi penelitian yang digunakan dalam menyelesaikan penelitian ini adalah menggunakan metodologi penelitian dan pengembangan (*Research and Development*). Penelitian dan pengembangan (*Research and Development*), adalah metode penelitian yang digunakan untuk menghasilkan produk-produk tertentu dan menguji keefektifan produk tersebut (Sugiyono, 2009:297).

Untuk langkah-langkah penelitian, sugiyono (2009:298) mengungkapkan bahwa siklus R&D tersusun dalam sepuluh langkah penelitian sebagai berikut: potensi dan masalah, pengumpulan data, desain produk, validasi desain, revisi

desain, ujicoba produk, revisi produk, ujicoba pemakaian, revisi produk dan produk masal.

Mengacu pada pendapat sugiyono diatas, peneliti memodifikasi tahapan tersebut menjadi empat tahapan yaitu mengumpulkan informasi, desain produk, ujicoba produk dan revisi produk. Untuk sistematika flowchart penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

3.3.1 Mengumpulkan informasi

Pada tahap mengumpulkan informasi merupakan analisis kebutuhan dari suatu sistem dimana kebutuhan yang pada umumnya yaitu *input* dan *output* yang akan digunakan dalam sistem tersebut.

Berdasarkan kajian pustaka dan hasil survey lapangan untuk membuat prototipe mobil listrik, sistem penggerak yang akan digunakan pada penelitian adalah motor jenis *brushless* dengan daya maksimum 350 Watt, peneliti menggunakan Arduino nano sebagai mikrokontroler dan mosfet N-Channel sebagai driver tiga fasa untuk menggerakkan motor. Perangkat lunak yang digunakan untuk penulisan program yaitu Arduino IDE.

3.3.2 Desain Produk

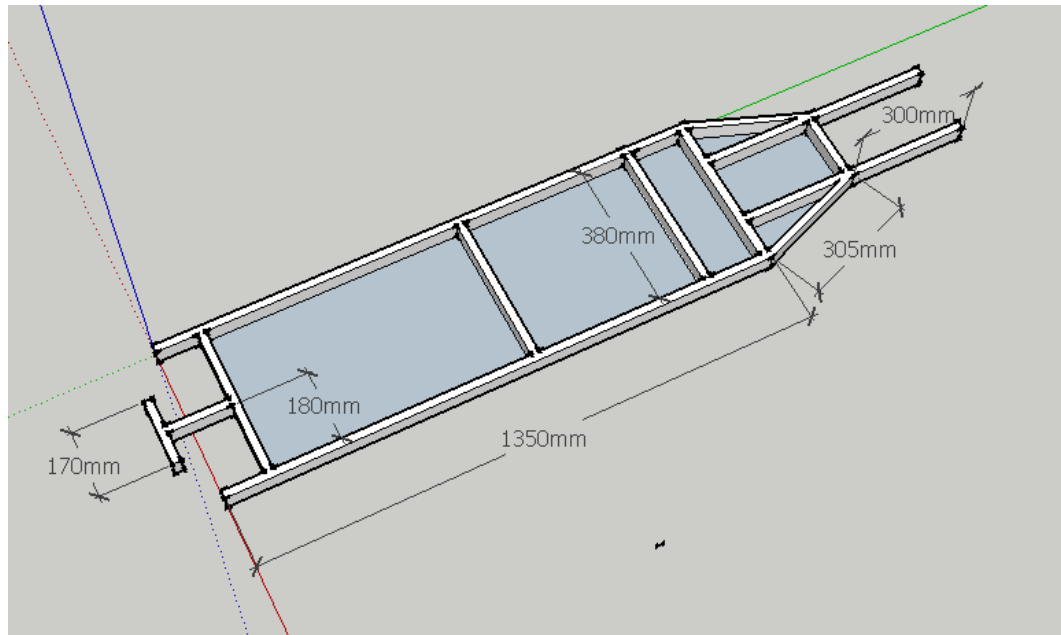
Pada tahap pengembangan bentuk awal produk, peneliti melakukan dua tahapan utama yaitu perancangan desain maket mobil listrik dan perancangan sistem penggerak berupa controller BLDC motor.

3.3.2.1 Rancangan Maket Prototipe Mobil Listrik

Pada perancangan maket mobil listrik, rancangan dibuat menggunakan *software* Sketcup 2014. Dalam perancangan mekanik terdapat beberapa tahapan rancangan yaitu rangka mobil, kendali kemudi (steering) dan dudukan motor.

1. Rangka Mobil

Rangka mobil terbuat dari aluminium kotak hollow 50x25 mm dengan tebal 2 mm dan untuk rollbar menggunakan pipa Aluminium diameter 30 mm. Berikut rancangan rangka mobil listrik dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3. 2 Perancangan Rangka mobil listrik Si-Sirung
(Sumber: dokumentasi pribadi)

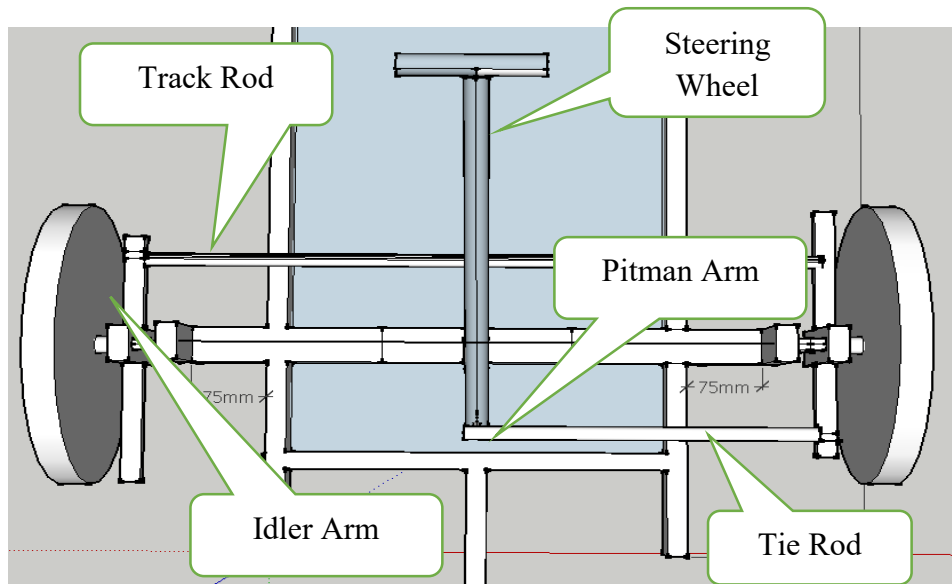
2. Desain *Steering* (kendali Kemudi)

Steer pada mobil berguna untuk mengendalikan arah gerak mobil agar sesuai yang diinginkan, sehingga mobil dapat melaju lurus ke depan maupun kebelakang dan dapat juga berbelok ke arah kiri maupun kanan. Bila steer mobil tidak bekerja dengan baik maka akan berpengaruh pada keselamatan dan kenyamanan dalam berkendara. Steer mobil berkaitan langsung antara pengemudi dengan roda mobil. Sistem kemudi merupakan perangkat wajib yang dimiliki oleh setiap kendaraan bermotor ke arah yang diinginkan oleh pengemudinya. Sebenarnya steer atau sistem kemudi hanya mengarahkan roda pada kendaraan bukan mengarahkan kendaraan, tetapi efeknya akan berimbas pada arah gerak kendaraan. Salah satu bukti bahwa steer hanya menggerakkan roda kendaraan dengan menggerakkan kendaraan ke arah kiri atau kanan pada saat mobil dalam keadaan tidak bergerak atau tidak jalan, pada saat steer digerakkan ke kanan maka

roda akan bergerak ke kanan atau pada saat steer digerakkan ke kiri maka roda akan bergerak ke kiri, tetapi tidak pada badan kendaraan tersebut.

Untuk memindahkan tenaga dari steer ke roda maka dibutuhkan steering linkage. Steering linkage berfungsi memindahkan tenaga dari roda kemudi ke roda bagian depan kendaraan. Pada steering linkage terdapat *pitman arm*, *knuckle arm*, *Adler arm*, *drag link* dan *tie rod*.

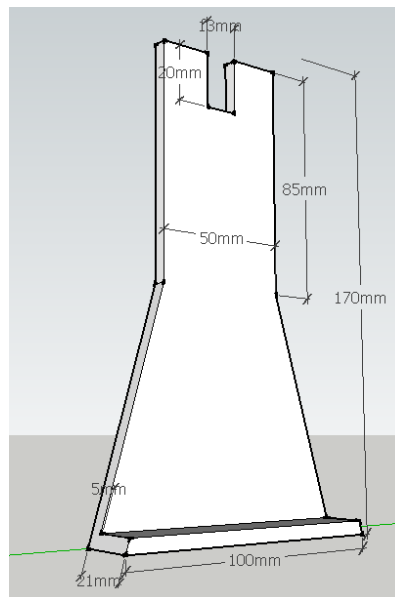
Untuk sistem Steering menggunakan sistem *Ackermann Geometry* yaitu pengaturan geometris hubungan di kemudi mobil atau kendaraan lain yang dirancang untuk memecahkan masalah roda di bagian dalam dan luar saat kendaraan berbelok atau dengan kata lain menelusuri lingkaran dengan jari-jari yang berbeda yang difungsikan untuk meminimalisir tergelincirnya mobil dan mengurangi friksi ketika berbelok. Untuk desain Tie Rod, Knuckle dan Steer menggunakan logam alumunium yang di bubut dan dibentuk sesuai kebutuhan. Rancangan steer dapat dilihat pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Rancangan *Steering*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3. Desain Dudukan Motor

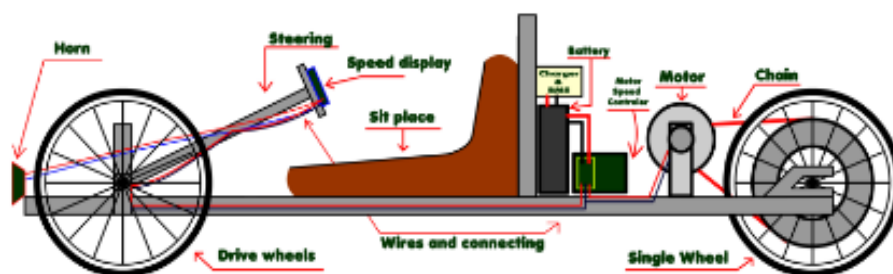
Rancangan dudukan motor dibuat sedemikian rupa agar motor dapat tertanam kokoh ketika menarik beban. Dudukan motor ini berfungsi sebagai penyangga batang as motor yang terdiri dari bagian kiri dan kanan. Dibawah ini adalah **Gambar 3.4** rancangan dudukan motor.



Gambar 3. 4 Rancangan Dudukan Motor

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Dari perancangan rangka, steering dan dudukan motor diharapkan dapat di realisasikan rancangan kendaraan seperti **Gambar 3.5**.

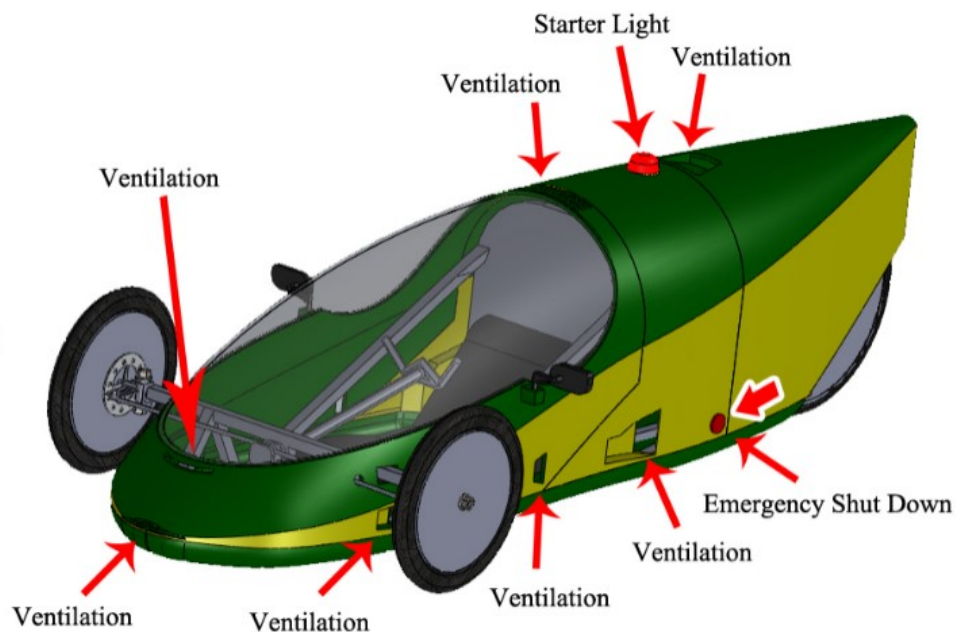


Gambar 3. 5 Rancangan Kendaraan

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4. Desain Bodi (casing)

Konsep rancangan mobil irit ini adalah mobil berjenis prototipe yang mempunyai dimensi 2640 mm x 510 mm x 610 mm (PxLxT). Mobil yang di rancang mempunyai tiga roda dengan komposisi dua rodan depan dan satu roda belakang. Perancangan ukuran bodi ini mengacu pada regulasi teknis Kontes Mobil Hemat Energi. Berikut rancangan desain bodi dapat dilihat pada **Gambar 3.6.**



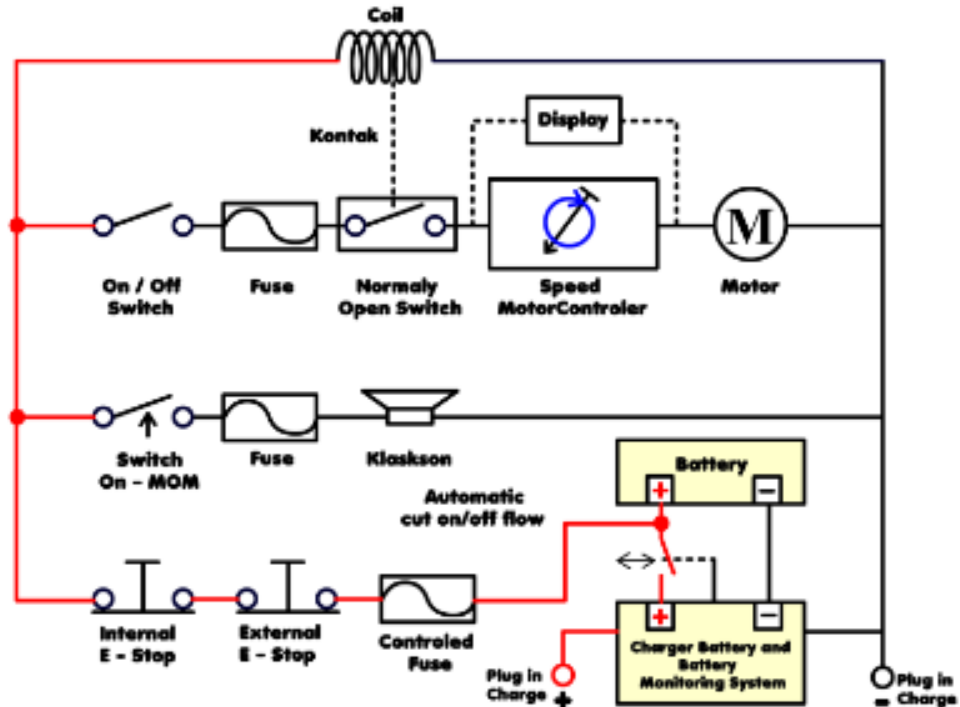
Gambar 3. 6 Desain Bodi
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3.3.2.2 Rancangan Sistem Kelistrikan Prototipe Mobil Listrik Si-Sirung

1. Rancangan Pengkabelan Mobil

Tahapan selanjutnya adalah perancangan pada sistem kelistrikan mobil yang terdiri dari tombol kontak utama (kunci kontak), klakson, tombol *emergency*

luar dan dalam dan konektor *charger* eksternal. Untuk wiring diagram kelistrikan dapat dilihat pada **Gambar 3.7**.

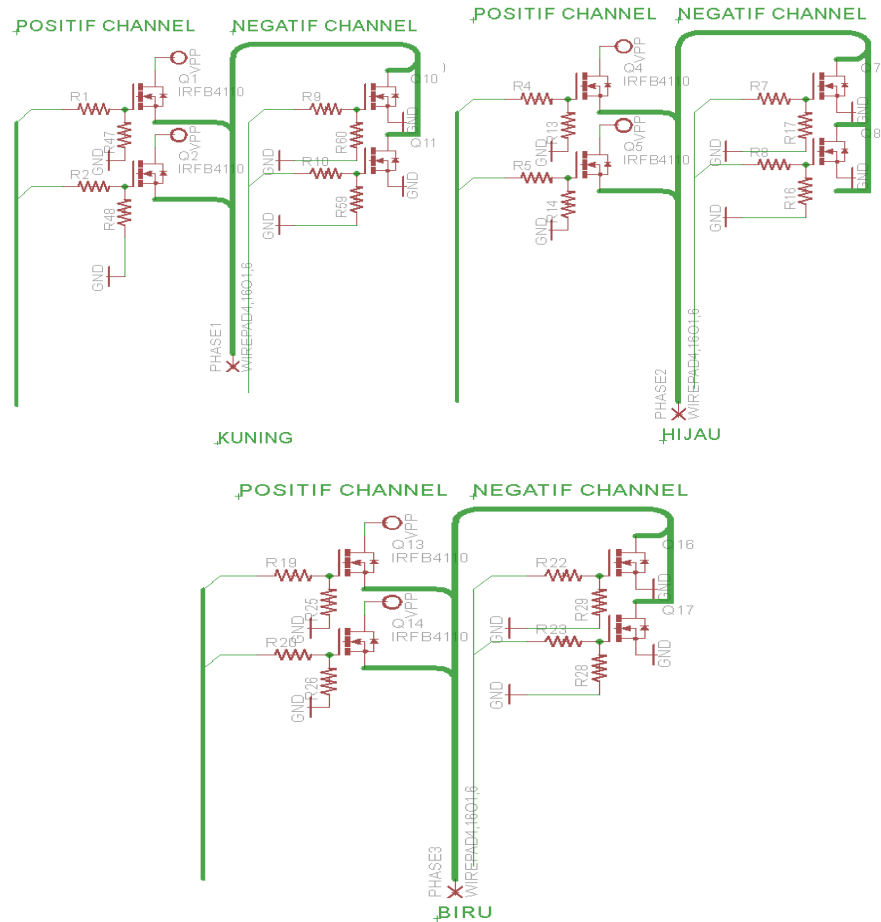


Gambar 3. 7 Rancangan Sistem Kelistrikan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2. Rancangan Kontroller BLDC

a) Rancangan Rangkaian Driver tiga fasa

Rangkaian driver tiga fasa pada sistem penggerak BLDC motor, peneliti menggunakan mosfet. Penggunaan mosfet dirasa sangat efektif karena mosfet mampu bekerja pada arus yang sangat tinggi dan ini dirasa cocok untuk menggerakkan BLDC motor. Driver Mosfet ini terdiri dari tiga bagian atas (High Side) dan tiga bagian Bawah (Low Side). Berikut rangkaian Driver mosfet tiga fasa dapat dilihat pada **Gambar 3.8**.

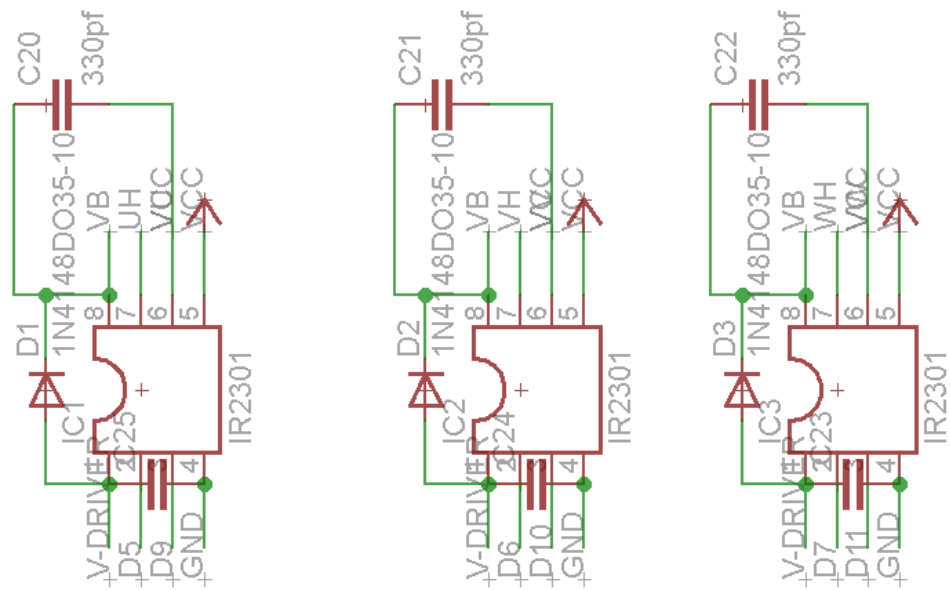


Gambar 3. 8 Rangkaian Driver Mosfet Tiga Fasa

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

b) Skema Driver Gate Mosfet Tiga Fasa

Rangkaian Driver Gate mosfet digunakan untuk mengaktifkan gate mosfet agar mosfet dapat bekerja dengan cara memberikan tegangan TTL (*Transistor Transistor Logic*) pada driver Gate. Pada penelitian ini peneliti menggunakan IC IR2301 dikarenakan IC ini sudah di desain untuk mengaktifkan Driver Mosfet Tiga Fasa. Berikut rangkaian driver gate mosfet dapat dilihat pada **Gambar 3.9**.

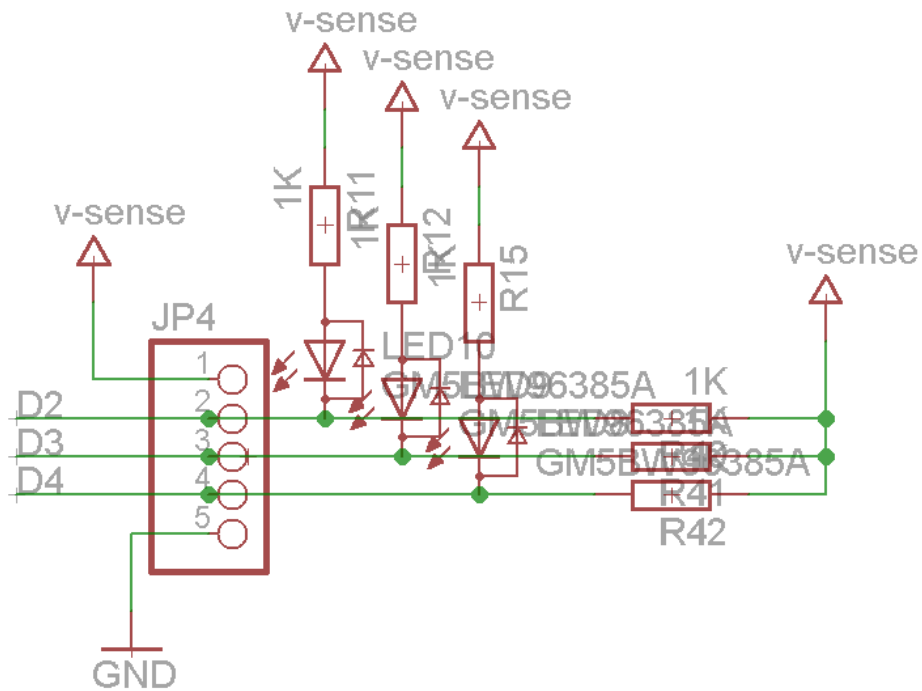


Gambar 3. 9 Rangkaian Driver Gate Mosfet

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

c) Rangkaian Hall Sensor

Hall Sensor adalah sensor pembaca letak posisi yang terletak di dalam motor dan untuk pengaktifannya dibutuhkan lagi rangkaian luar . berikut rangkaian Hall Sensor dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.

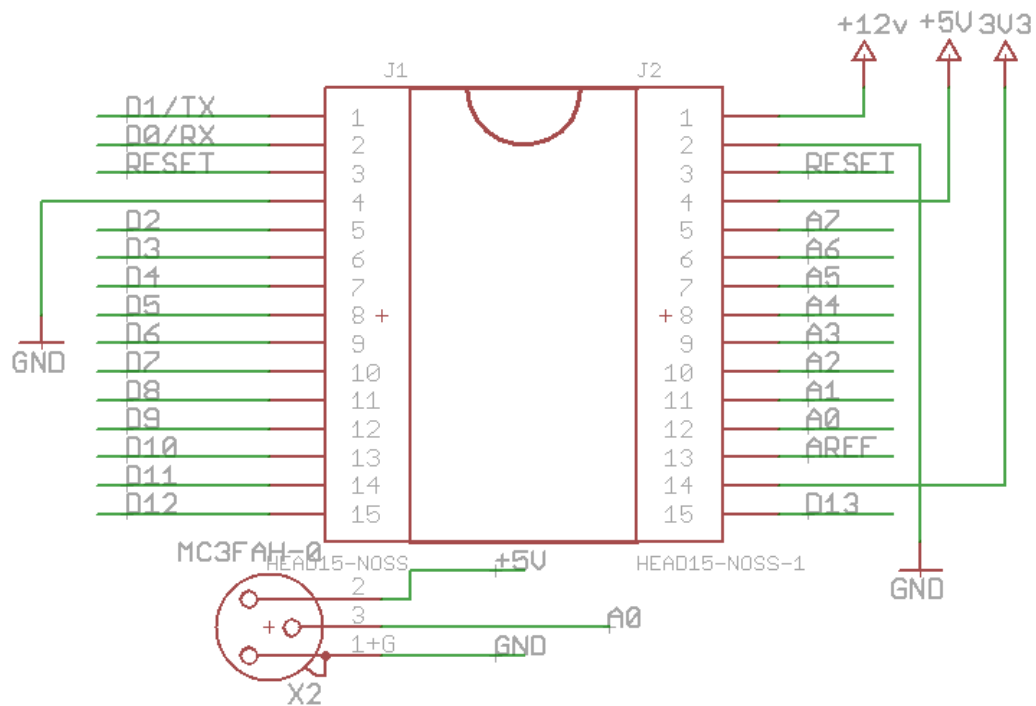


Gambar 3. 10 Rangkaian Hall Sensor

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

d) Rangkaian Minimum sistem Atmega328

Rangkaian minimum sistem adalah rangkaian yang akan berfungsi mengontrol pada sistem penggerak BLDC motor. Pada penelitian ini digunakan sebuah IC mikrokontroler ATmega328. Penggunaan mikrokontroler ATmega328 dirasa efektif karena memiliki pin input dan output yang cukup untuk sistem penggerak BLDC dan juga memiliki bentuk yang kecil. Berikut rangkaian sistem minimum ATmega328 dapat dilihat pada **Gambar 3.11**.

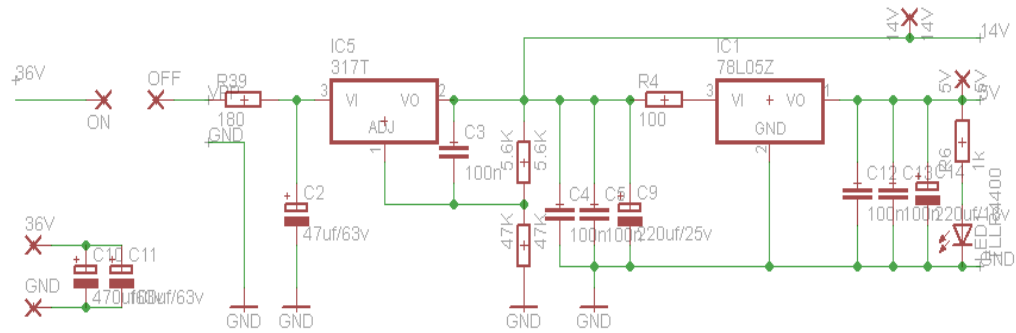


Gambar 3. 11 Rangkaian Sistem Minimum ATmega 328

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

e) Rangkaian Regulator tegangan 36V ke 14V dan 5V

Rangkaian regulator adalah rangkaian yang akan berfungsi sebagai catu daya utama pada sistem penggerak BLDC motor, dikarenakan pada sistem penggerak BLDC membutuhkan beberapa level tegangan maka diperlukan regulator tegangan yang berbeda yaitu tegangan 24-36V akan digunakan untuk tegangan sumber pada mosfet, 14V akan digunakan untuk sumber tegangan Driver Gate mosfet dan tegangan 5V akan digunakan untuk sumber tegangan mikrokontroller dan sensor. Berikut rangkaian regulator tegangan untuk sistem penggerak BLDC motor dapat dilihat pada **Gambar 3.12**.

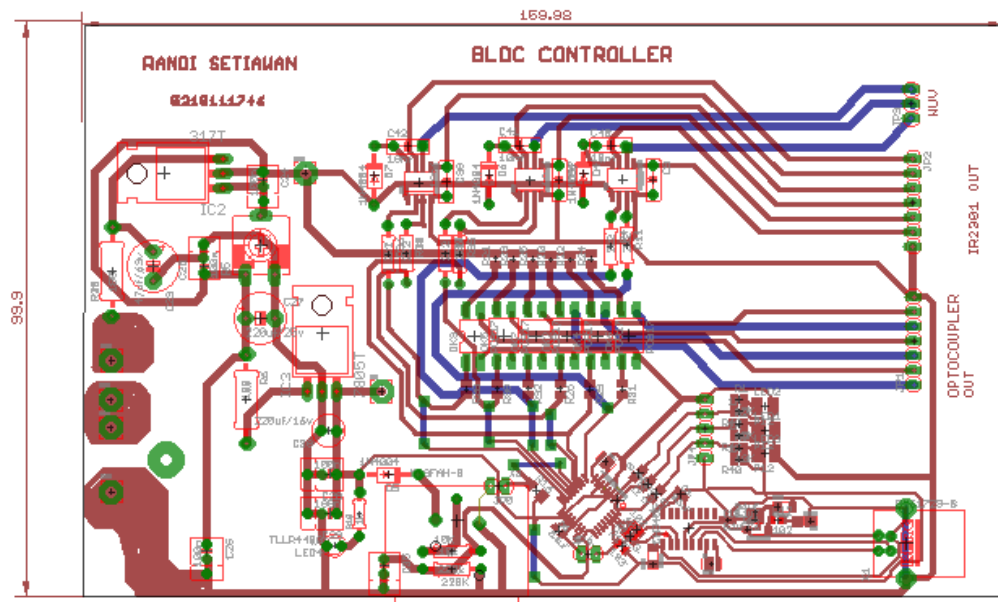


Gambar 3. 12 Rangkaian Regulator Tegangan

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

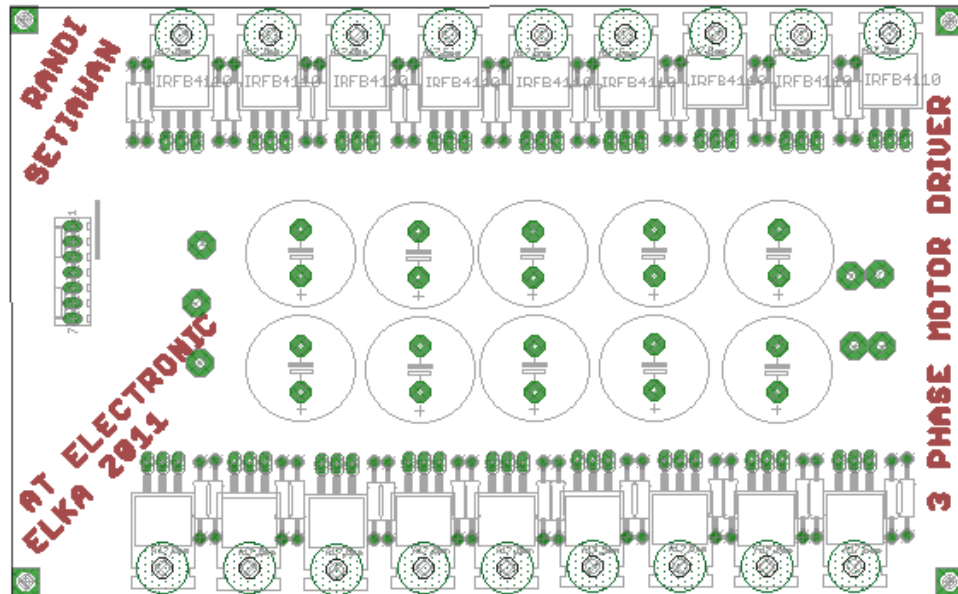
f) *Layout* Rangkaian

Layout rangkaian adalah rancangan model PCB yang akan dibuat pada sistem, pada penelitian ini seluruh rangkaian digabungkan dalam satu layout PCB yang terdiri dari bagian atas dan bawah dan akan digunakan PCB double layer. Berikut rancangan layout yang akan digunakan pada sistem penggerak BLDC motor dapat dilihat pada **Gambar 3.13** dan **Gambar 3.14**.



Gambar 3. 13 Layout Sistem Kendali

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Gambar 3. 14 Layout Driver Mosfet Tiga Fasa
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

g) Perancangan Program Kontroller BLDC

Perancangan perangkat lunak berupa perancangan program yang dibuat untuk mendukung sistem kerja *Brushless Dc Motor* agar dapat berputar. Rancangan program diawali dengan penentuan pin input dan output yang akan digunakan. Berikut pin input yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3. 1 Penggunaan Pin Input pada ATmega328

| No | Perangkat input | Port ATmega |
|----|-----------------------|----------------|
| 1 | Potensio pengatur PWM | Port C0 (ADC0) |
| 2 | Hall sensor1 | Port D2 |
| 3 | Hall sensor | Port D3 |
| 4 | Hall sensor | Port D4 |

Untuk penggunaan pin *output* pada ATmega328 dapat dilihat pada **Tabel**

3.2.

Tabel 3. 2 Penggunaan Pin *Output* Pada Atmega328

| No | Perangkat output | Port ATmega |
|----|--------------------|--------------------------|
| 1 | Driver Gate Mosfet | Port D5-D7 Port B1-B3 |

3.3.4 Instrumen Penelitian

Adapun instrumen penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. BLDC motor

BLDC motor yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. Merek : *Sun Race*
- b. Tegangan maksimal : 36V
- c. P Max : 350 Watt
- d. Model socket : Skun bulat lonjong (Male)
- e. *Socket hall* : *Socket* 6 pin isi 5. (Male)
- f. Jumlah ruji : 36 lubang
- g. *Rim velg* : 20", 24", 26" 700c, dan 17" ring sepeda motor
- h. *Open size as* : 15 cm. panjang as = 18cm
- i. Bobot : 6.1 Kg.
- j. Sistem rem : Fleksibel (terdapat drat untuk adapter tromol maupun disk brake)

2. Baterai (Aki) yang digunakan mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

- a. Model : Chilwee 6-DZM-20

- b. *Voltage* : 12V
 - c. Kapasitas (Ah) : 20
 - d. Dimensi : P= 18.1cm, L= 8cm, T= 17
 - e. Berat (Kg) : 7.1
3. Watt meter dengan spesifikasi sebagai berikut:
- a. Merek : JPN
 - b. Model : DC WH Meter 60v 100A
 - c. Range voltage : 4V-60V
 - d. Range ampere : 0.01 A – 100 A
 - e. Range watage : 0 W – 6554 Wh
4. Sensor kecepatan merek Cateye dengan spesifikasi sebagai berikut:
- a. Model : Cateye CC-VL820-Velo 9
 - b. Kecepatan arus : 0.0 (4.0) ~ 199,9 km / h
 - c. Waktu berlalu : 0: 00'00 " ~ 9: 59'59"
 - d. Jarak perjalanan : 0.00 ~ 999.99km
 - e. Kecepatan rata-rata : 0.0 ~ 199.9km / h
 - f. Kecepatan maks. : 0,0 ~ 199,9 km / jam [0,0 ~ 124,9 mph]
5. Sistem komputer yang digunakan dalam penelitian memiliki spesifikasi sebagai berikut:
- a. Processor AMD *dual core processor C-70*
 - b. RAM 2 GB DDR3
 - c. *Hard disk* 320 GB
 - d. VGA AMD Radeon
 - e. Sistem Operasi *Microsoft Windows* 10 64 bit

- f. LCD 11 Inch
6. Software pendukung diantaranya
- a. *CadSoft Eagle* Versi 6.4 yang digunakan untuk membuat skema dan layout rangkaian.
 - b. *Proteus 7.7* digunakan untuk simulasi rangkaian
 - c. *Microsoft Office 2013*
 - d. *Arduino IDE 1.6.5* digunakan untuk pembuatan sintak program ATmega328.
 - e. *SketchUp 2014* digunakan untuk membuat rancangan desain
7. Alat Ukur
- a. Multimeter digital Sanwa CD800a.
 - b. Multimeter analog Sunwa YX-360TR_{N-L}.
8. Perangkat Pendukung
- a. Solder Listrik
 - b. Solder Uap (Blower)
 - c. Antraktor (Penyedot timah)
 - d. *Mini Elektrick drill* (bor tangan kecil)
 - e. Bor Tangan Besar
 - f. *Drilling sets* (mata bor)
 - g. Screwdrivers (macam-macam obeng)
 - h. Kunci-kunci
 - i. Tang jepit, tang potong, pinset

3.3.5 Uji Coba Produk

Pada tahap uji coba produk, tahapan pertama peneliti akan menguji karakteristik pada kontroller BLDC motor yang akan di terapkan pada prototipe mobil listrik diantaranya *Throttle control*, *Hall Sensor driver gate mosfet* dan driver mosfet tiga fasa. Tahapan selanjutnya adalah menguji performa mobil listrik agar tercapai tujuan penelitian yang di harapkan..

Adapun kriteria pengujian mobil listrik dilakukan dengan dua metode yaitu pengujian tanpa beban dan pengujian dengan beban berupa pengemudi.

3.3.5.1 Kriteria Pengukuran *Throttle Control*

Pada tahap uji pengukuran *Throttle control*, peneliti menggunakan multi meter untuk mengetahui nilai tegangan yang di hasilkan oleh *throttle control*. Cara untuk mendapatkan hasil dari *throttle control* peneliti akan memberikan tegangan 5 volt pada *throttle controll* tersebut kemudian mengukur tegangan yang di hasilkan dari output *throttle control* tersebut, kemudian peneliti akan memutar bukaan *throttle control* sebanyak $\frac{1}{4}$ bukaan (pendekatan), $\frac{1}{2}$ bukaan (pendekatan), $\frac{3}{4}$ bukaan dan bukaan penuh. sehingga pada layar multi meter akan menunjukkan tegangan yang di hasilkan oleh *throttle control*.

Hasil yang didapat akan dimasukkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 kriteria pengujian *throttle control*

| Bukaan <i>throttle control</i> | Kriteria Pengukuran | Hasil Pengukuran | |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| | Tegangan yang di hasilkan | Tegangan yang di hasilkan | Dokumentasi |
| 1/4 | $\pm 1,2$ Volt | | |
| 1/2 | $\pm 2,4$ Volt | | |
| 3/4 | $\pm 3,6$ Volt | | |
| penuh | ± 5 Volt | | |

3.3.5.2 Kriteria Pengujian *Hall Sensor*

Pengujian pada *hall sensor* dilakukan dengan cara menyambungkan kabel *hall sensor* motor pada rangkaian yang telah dibuat kemudian memutar motor secara manual dengan tangan untuk agar keluaran *hall sensor* terjadi perubahan, kriteria yang di uji adalah apakah nilai deretan bit dari *hall sensor* keluar dan apakah sesuai dengan kriteria *six step commutation*.

Hasil yang didapat akan dimasukkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3. 4 Pengujian Hall Sensor

| Step | Kriteria Pengujian | | | Hasil Pengujian | | | Keterangan |
|------|--------------------|----|----|-----------------|----|----|------------|
| | H1 | H1 | H3 | H1 | H1 | H3 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 2 | 1 | 1 | 0 | | | | |
| 3 | 1 | 1 | 0 | | | | |
| 4 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 5 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| 6 | 0 | 0 | 1 | | | | |

3.3.5.3 Pengujian Pada Driver Tiga Fasa

Pengujian pada driver tiga fasa dilakukan dengan cara memberikan tegangan pada driver kemudian memberi tegangan input TTL pada titik input driver gate dan mengukur tegangan output driver gate. Jika pada driver gate terdapat

tegangan maka selanjutnya pengukuran dilakukan pada output mosfet yang masing-masing pada titik U terhadap V, V terhadap W dan W terhadap U.

Hasil pengukuran dimasukkan kedalam **Tabel 3.5**.

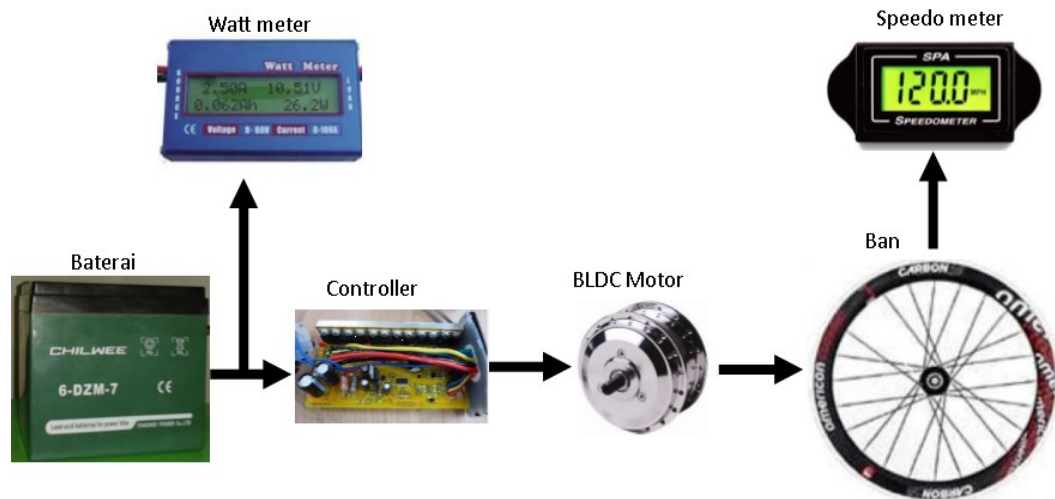
Tabel 3. 5 kriteria pengujian driver mosfet

| Fasa | Kriteria Pengujian | | | | Hasil Pengujian | | Keterangan |
|------|--------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-----------|------------|
| | Kondisi input | | Output | | Output | | |
| | input | | Low Side | High Side | Low Side | High Side | |
| | High side | Low Side | | | | | |
| U | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | | | |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | | | |
| V | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | | | |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | | | |
| W | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | | | |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | | | |

3.3.5.4 Pengujian Performa Mobil Listrik

Pengujian selanjutnya adalah pengujian performa mobil listrik. Pengujian mobil listrik ini dilakukan dengan dua tahapan yaitu pengujian performa mobil listrik tanpa beban dan pengujian performa mobil listrik dengan beban.

Sebelum pengujian dilakukan, alat uji berupa speedometer dan watt meter dirangkai pada mobil sesuai dengan skema pada **Gambar 3.15**. Demi kebutuhan pencatatan data maka semua alat ukur yang di pasang akan di rekam menggunakan hand phone yang akan di pasang pada mobil listrik.



Gambar 3. 15 Skema Pengujian Mobil Listrik

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pengujian dilakukan dengan beberapa metode yaitu:

1. Mengambil data performa mobil listrik yang diwakili oleh variable arus, tegangan, daya input, daya output serta kecepatan pada keadaan tanpa beban.
2. Mengambil data performa mobil listrik yang diwakili oleh variable arus, tegangan, daya input, daya output serta kecepatan pada satu putaran lintasan dengan kondisi jalan yang bervariasi.
3. Mengumpulkan dan mengolah data-data yang diperoleh pada tabel serta mengevaluasinya.

A. Prosedur Pengambilan Data Performa Mobil Listrik Tanpa Beban

Pengambilan data pada mode ini dilakukan tanpa menggunakan beban, adapun teknik pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mobil listrik dipasang alat ukur Watt meter dan sensor kecepatan.
2. Mobil listrik di jalankan hingga bukaan thorttle mencapai maksimal.
3. Watt meter di reset hingga menunjukkan nilai nol ketika pembacaan speedo meter sudah mencapai kecepatan maksimal.

4. Pengambilan data dimulai setelah watt meter di reset dan dilakukan selama 15 menit.
5. Data yang ditampilkan alat ukur di rekam menggunakan kamera hand phone yang di pasang pada mobil.
6. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali.
7. Data dimasukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 6 Pengujian data performa mobil listrik berdasarkan kondisi jalan

| Pengujian | Penggunaan Daya | Kecepatan | Gambar Pada Watt Meter |
|-------------------|-----------------|-----------|------------------------|
| Pengujian Pertama | | | |
| Pengujian Kedua | | | |
| Pengujian Ketiga | | | |

$$\text{Rata - rata Daya} = \frac{\text{pengujian 1} + \text{pengujian 2} + \text{pengujian 3}}{\text{Jumlah data}}$$

$$\text{Rata - rata kecepatan} = \frac{\text{pengujian 1} + \text{pengujian 2} + \text{pengujian 3}}{\text{Jumlah data}}$$

B. Prosedur Pengambilan Data Performa Mobil Listrik dengan Beban Pada Satu Putaran Track

Pengambilan data pada mode ini dilakukan dengan menggunakan beban yaitu pengemudi, adapun teknik pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Kondisi Pengujian

Berat pengemudi : 50 Kg

Jarak Tempuh : 800 meter

2. Teknik Pengujian

- a. Mobil listrik dipasang alat ukur Watt meter dan sensor kecepatan
- b. Watt meter di reset terlebih dahulu sebelum pengujian hingga menunjukkan nilai nol.
- c. Mobil listrik di jalankan hingga mencapai kecepatan yang di tentukan.
- d. Putaran throttle tidak ditentukan namun sesuai dengan kondisi jalan yang dilalui.
- e. Data yang ditampilkan alat ukur di rekam menggunakan kamera hand phone yang di pasang pada mobil.
- f. Data dimasukkan pada Tabel 3.4.
- g. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali.

Tabel 3. 7 Pengujian data performa mobil listrik pada satu putaran track

| Pengujian | Penggunaan Daya | Gambar Pada Watt Meter |
|-------------------|-----------------|------------------------|
| Pengujian Pertama | | |
| Pengujian Kedua | | |
| Pengujian Ketiga | | |

$$Rata - rata = \frac{pengujian\ 1 + pengujian\ 2 + pengujian\ 3}{Jumlah\ data}$$

3.3.6 Revisi Produk

Revisi produk dilakukan apabila dalam pemakaian kondisi nyata terdapat kekurangan dan kelemahan.

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1 Hasil Penelitian

Hasil pengujian yang telah dilakukan pada Prototipe Mobil Listrik dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Pengujian performa mobil listrik Tanpa Beban.
2. Pengujian performa mobil listrik dengan beban yaitu pengemudi pada satu putaran lintasan sepanjang 800 meter.

4.1.1 Hasil Pembuatan Maket Mobil Listrik

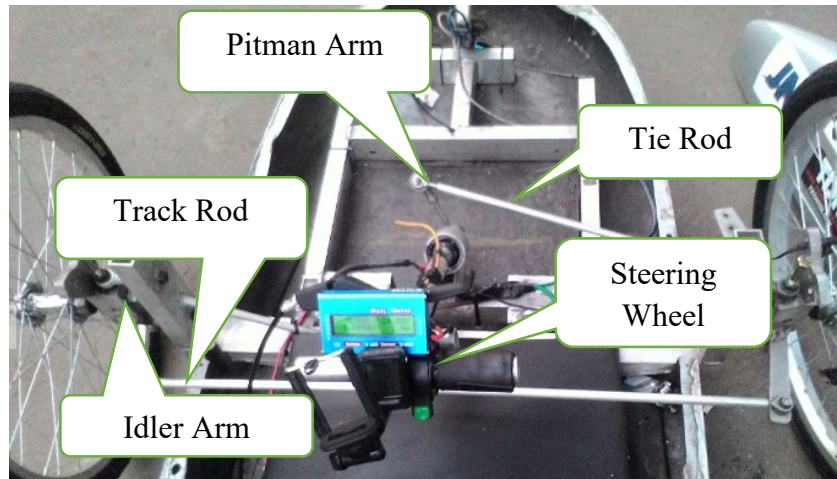
Maket prototipe mobil listrik ini terdiri dari bagian rangka, steering bodi dan sistem penggerak. Berikut gambar realisasi maket rangka mobil dapat dilihat pada

Gambar 4.1.



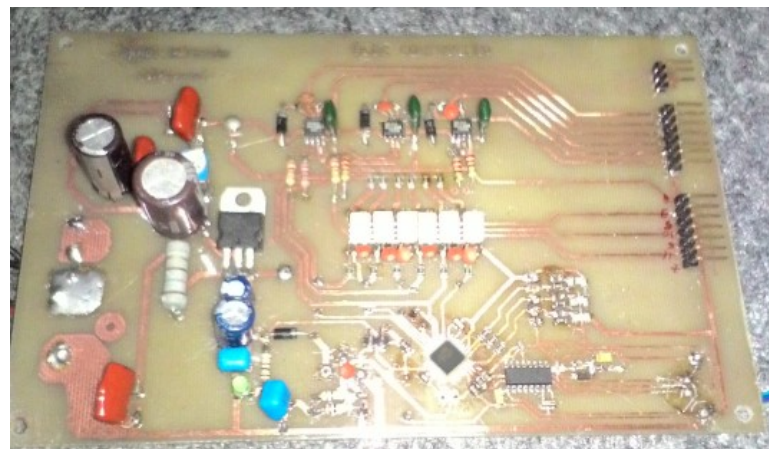
Gambar 4.1 Realisasi Rangka
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Setelah rangka selesai maka selanjtnya adalah pemasangan mekanik *steering* pada rangka. Realisasi mekanik steering dapat dilihat pada **Gambar 4.2.**



Gambar 4. 2 Realisasi Sistem Kemudi
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tahapan selanjutnya adalah ke bagian sistem elektrik yaitu sistem penggerak. Tahapan pertama adalah realisasi rangkaian sistem pengontrol untuk BLDC motor yang dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4. 3 Kontroller BLDC Motor
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Setelah kontroller terealisasi, tahapan selanjutnya adalah pembuatan inverter mosfet tiga fasa yang dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



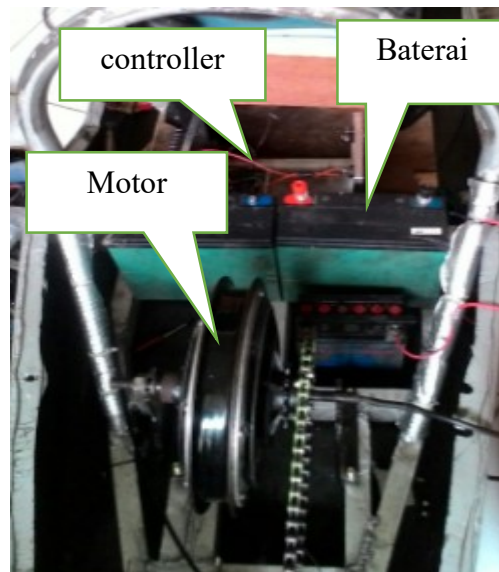
Gambar 4. 4 Inverter Mosfet Tiga Fasa
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Setelah semua rangkaian terealisasi, tahapan selanjutnya adalah pemberian kotak (*casing*) untuk rangkaian tersebut yang dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4. 5 casing Kontroller
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Realisasi selanjutnya adalah sistem pemasangan penggerak pada prototipe mobil listrik yang dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4. 6 Realisasi Sistem Penggerak pada Prototipe Mobil Listrik
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Setelah pemasangan sistem penggerak maka tahapan selanjutnya adalah realisasi pemasangan bodi mobil yang dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.7 Realisasi Bodi Mobil
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

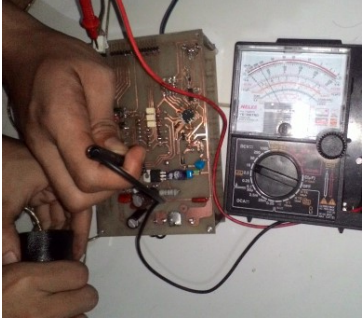
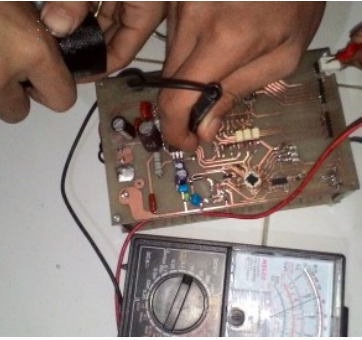
4.1.2 Hasil Pengujian dan Pembahasan

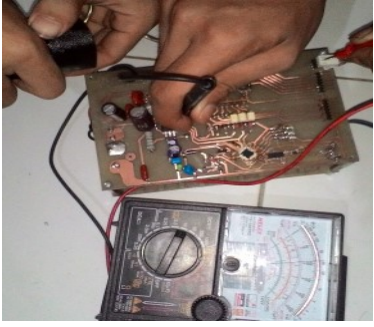

Pengujian dilakukan sesuai dengan perencanaan sebelumnya yaitu menguji masing-masing sub sistem dan menguji performa mobil listrik pada dua metode yaitu pengujian mobil listrik tanpa beban dan pengujian mobil listrik dengan beban pada satu putaran lintasan.

4.1.2.1 Hasil Pengujian *throttle control*

Telah didapat hasil pengukuran *Throttle Control*. Berikut hasil yang telah didapat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran *Throttle Control*

| Bukaan <i>throttle control</i> | Kriteria Pengukuran | |
|---|--------------------------------------|--|
| | Tegangan yang di hasilkan | Dokumentasi |
| 1/4 | 1,3 Volt |  |
| 1/2 | 2,5 Volt |  |

| | | |
|-------|----------|--|
| ¾ | 3,8 Volt |  |
| Penuh | 4,8 Volt |  |

4.1.2.2 Hasil Pengujian *Hall Sensor*

Telah didapat kombinasi logika yang dihasilkan pada *Hall sensor*. Berikut hasil yang telah didapat pada **Tabel 4.2**.

| Step | Kriteria Pengujian | | | Hasil Pengujian | | | Keterangan |
|------|--------------------|----|----|-----------------|----|----|------------|
| | H1 | H1 | H3 | H1 | H1 | H3 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | Berhasil |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | Berhasil |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | Berhasil |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Berhasil |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | Berhasil |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | Berhasil |

4.1.2.3 Hasil Pengujian Driver Mosfet




Telah didapat hasil pengujian pada driver gate mosfet dengan menggunakan ic ir2301. Berikut hasil yang telah didapat pada tabel 4.2.

| Fasa | Kriteria Pengujian | | | | Hasil Pengujian | | Keterangan |
|------|--------------------|----------|----------|-----------|-----------------|-----------|------------|
| | Kondisi input | | Output | | Output | | |
| | input | | Low Side | High Side | Low Side | High Side | |
| | High side | Low Side | | | | | |
| U | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | 0 Volt | Berhasil |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | Berhasil |
| V | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | 0 Volt | Berhasil |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | Berhasil |
| W | 1 | 0 | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | 0 Volt | Berhasil |
| | 0 | 1 | 0 Volt | ±12 Volt | 0 Volt | 11 Volt | Berhasil |

4.1.2.4 Data Performa Mobil Listrik Tanpa Beban

Penelitian pertama yaitu menguji performa mobil listrik tanpa beban. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro UNJ. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan sistematika pengujian yang telah direncanakan sebelumnya yaitu dilakukan dengan cara membuka throttle sampai bukaan penuh sehingga Speedo Meter menunjukkan kecepatan maksimal yang konstan kemudian watt meter di reset dan pengambilan data dimulai. Pengujian ini dilakukan selama 15 menit setiap pengujian sebanyak tiga kali kemudian data dicatat dan dimasukkan kedalam **Tabel 4.1** untuk dianalisis.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Performa Mobil Listrik Tanpa Beban

| Pengujian | Penggunaan daya pada setiap pengujian | Gambar pada watt meter pada kondisi terakhir saat pengujian |
|-------------------|---------------------------------------|--|
| Pengujian Pertama | 6.2 Wh |  |
| Pengujian Kedua | 6.2 Wh |  |
| Pengujian Ketiga | 6.2 Wh |  |

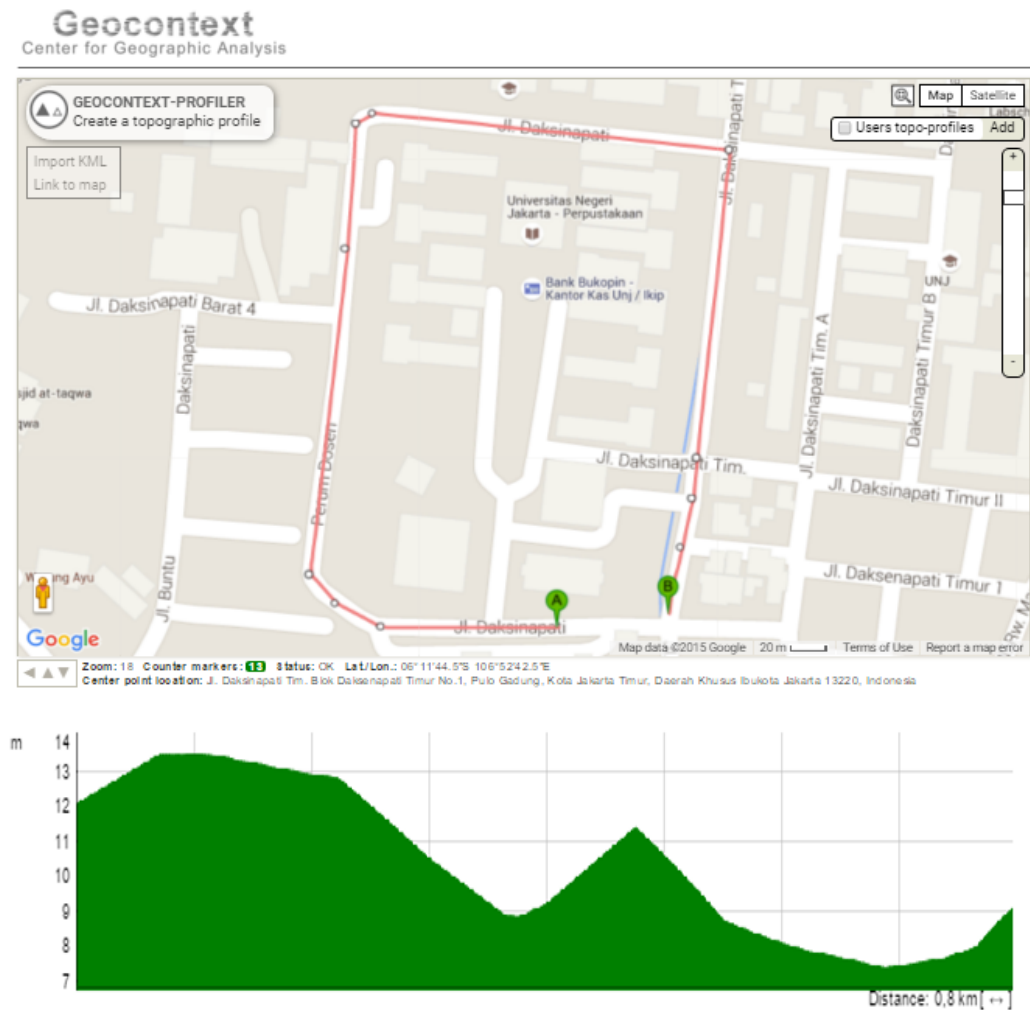
$$\begin{aligned}
 \text{Rata - rata} &= \frac{\text{pengujian 1} + \text{pengujian 2} + \text{pengujian 3}}{\text{Jumlah data}} \\
 &= \frac{6.2 + 6.2 + 6.2}{3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{18}{3} \\ &= 6.2 \text{ Wh} \end{aligned}$$

4.1.2.5 Data Performa Mobil Listrik dengan Beban Pada Satu Putaran

Lintasan 800 meter

Penelitian selanjutnya dilakukan dengan cara menguji performa mobil listrik satu putaran track mulai dari jalan Daksinapati menuju perum dosen dan berakhir di jalan Daksinapati Tim.1 dan berakhir di pintu gerbang keluar parkir mobil Universitas Negeri . Pemilihan jalan dilakukan berdasarkan pembacaan dari situs geocontextx.org dengan kondisi jalan memiliki varian yang berbeda sepanjang 800 meter. Peta track dapat dilihat pada **Gambar 4.8**.






Gambar 4. 8 Peta Jalan Satu Putaran Track

(Sumber: www.geocontext.org)

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan sistematika pengujian yang telah direncanakan yaitu dilakukan pada satu putaran track dan kondisi jalan yang bervariasi dengan jarak 800 meter kemudian data dicatat dan dimasukkan kedalam tabel untuk dianalisis. Dalam pengambilan data, perilaku pengendara dalam membuka putaran throttle dilakukan dengan cara yang berbeda. Pengendara diberikan kebebasan dalam pembukaan throttle sesuai dengan kondisi jalan yang dilewati. Hasil pengujian pada satu putaran track dengan jarak 800 meter dapat dilihat pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Performa Mobil Listrik pada Satu Putaran Track dengan Jarak 800 meter

| Pengujian | Penggunaan daya pada setiap pengujian | Gambar pada watt meter pada kondisi terakhir saat pengujian |
|-------------------|---------------------------------------|--|
| Pengujian Pertama | 2.5 Wh |  |
| Pengujian Kedua | 2.7 Wh |  |
| Pengujian Ketiga | 2.5 Wh |  |

$$\begin{aligned}
 \text{Rata - rata} &= \frac{\text{pengujian 1} + \text{pengujian 2} + \text{pengujian 3}}{\text{Jumlah data}} \\
 &= \frac{2.5 + 2.7 + 2.5}{3} \\
 &= \frac{7.7}{3} \\
 &= 2.56 \text{ Wh}
 \end{aligned}$$

4.2 Pembahasan

Pada pengujian tanpa beban, dapat di cari nilai rata-rata konsumsi energi yang digunakan mobil listrik yaitu sebesar 6,2 Wh selama 15 menit dengan kecepatan konstan sebesar 38 Km/jam dari awal pengujian sampai akhir pengujian. maka dapat diketahui jarak tempuh setiap 1 Wh adalah 1.532 meter.

Pengujian dengan beban berupa pengemudi pada satu putaran lap dengan jarak 800 meter dan metode berkendara yang digunakan, konsumsi energi yang digunakan dengan metode ini yaitu sebesar 2.56 Wh tanpa melepas penuh bukaan *throttle*. Maka dapat diketahui jarak tempuh setiap 1 Wh sebanyak 312,5 meter.

Dari pengujian dengan beban dan tanpa beban yang telah dilaksanakan terdapat perbedaan penggunaan daya yang signifikan. Penggunaan daya pada pengujian tanpa beban dengan satu putaran lap adalah 1:4,9. Hal ini terjadi karena pada pengujian pada satu putaran lap terdapat faktor yang mempengaruhi konsumsi daya diantaranya beban kendaraan dan pengemudi, gaya gesek yang terjadi antara ban dengan jalan dan kondisi jalan yang bervariasi yang dalam penelitian ini faktor-faktor tersebut menjadi variabel bebas yang tidak termasuk kedalam pembahasan penelitian.

Sesuai dengan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat diketahui kelebihan dan kekurangan mobil listrik yang telah di rancang. Adapun kelebihan dari mobil listrik ini adalah kemampuan menempuh jarak sepanjang 312 m hanya dengan menggunakan daya sebesar 1 Wh pada satu putaran lap dengan jarak 800 meter.

Disamping kelebihan yang dimiliki oleh mobil listrik yang telah di teliti, terdapat kekurangan-kekurangan dari mobil listrik ini diantaranya:

1. masih belum terdapat sistem manajemen baterai yang berfungsi mengatur pasokan arus yang keluar menuju motor.
2. Baterai yang digunakan mempunyai bobot yang masih berat sehingga bobot mobil pun berat dan mempengaruhi penggunaan arus pada tarikan awal saat mobil melaju di lintasan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Prototipe Mobil Listrik Si-Sirung dengan BLDC Motor 350 Watt berhasil di realisasikan sesuai spesifikasi yang di harapkan dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Mobil listrik mengkonsumsi daya sebesar 6 Wh selama 15 menit dengan kecepatan maksimal 38 Km/Jam.
2. Mobil listrik pada satu putaran lintasan sepanjang 800 meter membutuhkan konsumsi daya 2,56 Wh tanpa melepas bokaan throttle, ini artinya mobil listrik mampu menempuh jarak 312 m/Wh dengan beban pengemudi seberat 50 Kg tanpa melepas bukaan *throttle*.

5.2 Saran

Dalam pembuatan mobil listrik ini masih ada kekurangan. Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya diantaranya sebagai berikut:

1. Penambahan sistem transmisi otomatis pada penggerak roda belakang untuk menjaga kestabilan penggunaan arus.
2. Penggunaan baterai yang lebih ringan namun mempunyai kapasitas yang besar.
3. Pengembangan *Baterai Management System* (BMS) pada bagian baterai agar penggunaan konsumsi baterai dapat diatur.
4. Pengembangan dibagian rangka dan bodi agar bobot mobil semakin ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Banzi, M. (2008). *Getting Started with Arduino, First Edition*. USA: O'Reilly.
- Budiharto, W. (2008). *Panduan Praktikum Mikrokontroler AVR Atmega16*. Jakarta: Gramedia.
- Delton, Tom (2004). *Automobile Electrical and Electronic Systems*. Oxford: Routledge
- Dharmawan, A. (2009). *Pengendalian Motor Brushless DC Dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATMEGA 16* [Skripsi]. Depok: Universitas Indonesia.
- Driss Yousfi, A. E. (2011). *Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems*. In E. Schartz, *Electric Vehicles – Modelling and Simulations*[Tesis]. Denmark: Aalborg University.
- Jani. Y, *Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motors Part 1*, Renesas Technology America, Inc
- <http://www.mpoweruk.com/motorsBrushless.htm>, diakses pada tanggal 29 Oktober 2015.
- https://id.wikipedia.org/wiki/Mobil_listrik.. diakses pada tanggal 29 Oktober 2015.
- Purwadi, A. (2015, November 27). *public.lskk.ee.itb.ac.id/Molina*. Retrieved from public.lskk.ee.itb.ac.id/Molina/Proposal%20Molina%20ITB%202014.pdf
- Rambabu, S. (2007). *Modeling And Control Of A Brushless Dc Motor* [Tesis]. India: Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela.
- Subekti, Agus (2015). *Regulasi Teknis KMHE 2015*. Malang: Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- Tim Dosen. (2012). *Buku Pedoman Penulisan Skripsi, Tugas Akhir dan Komprehensif*. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.
- Schaltz, E. (2011). *Electrical Vehicle Design and Modeling* [Tesis]. Denmark: Aalborg University.
- T. Kenjo ;& S. Nagamori, 1985. *Permanent-magnet and Brushless DC motors- (Monographs in electrical and electonic engineering)* [Tesis]. New York: Oxford University.
- Wilberg, J. (2003). *Controlling a Brushless DC Motor*[Tesis]. swedia: University Linkoping Swedia,.
- Zulmain. (2009). *Prototipe Mobil Listrik Menggunakan Motor DC Magnet Permanen 0,37 HP*[Skripsi]. Depok: Universitas Indonesia.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Kontroller




```
//SKRIPSI MOBIL LISTRIK UNJ
//BY RANDI SETIAWAN
//5215111746
//MOBIL LISTRIK INI SAYA DEDIKASIKAN KEPADA KLUB SEM-UNJ
int HallState1; //Variable hall sensors (3,2,1)
int HallState2;
int HallState3;
int HallVal = 1; //kondisi biner 3 hall sensors
int mSpeed = 0; //maju
int bSpeed = 0; //rem level
int throttle = 0; //turtle
void setup() {
  pinMode(2,INPUT); // Hall 1
  pinMode(3,INPUT); // Hall 2
  pinMode(4,INPUT); // Hall 3
  pinMode(5,OUTPUT); // IN 1
  pinMode(6,OUTPUT); // IN 2
  pinMode(7,OUTPUT); // IN 3
  pinMode(9,OUTPUT); // EN 1
  pinMode(10,OUTPUT); // EN 2
  pinMode(11,OUTPUT); // EN 3
  Serial.begin(9600);
  //Set PWM frequency on pins 9,10, and 11
  int prescalerVal = 0x01;
  //create a variable called prescalerVal and set it equal to the binary number "00000111"
  TCCR1B &= ~prescalerVal; //AND the value in TCCR0B with binary number "11111000"
  //Now set the appropriate prescaler bits:
  int prescalerVal2 = 1; //set prescalerVal equal to binary number "00000001"
  TCCR1B |= prescalerVal2; //OR the value in TCCR0B with binary number "00000001"

  // Set PWM for pins 3,11 to 32 kHz (Only pin 11 is used in this program)
  //First clear all three prescaler bits:
  TCCR2B &= ~prescalerVal; //AND the value in TCCR0B with binary number "11111000"
  //Now set the appropriate prescaler bits:
  TCCR2B |= prescalerVal2; //OR the value in TCCR0B with binary number "00000001"//First
  clear all three prescaler bits:
}
void loop(){
  throttle = analogRead(0);
  mSpeed = map(throttle, 50, 1023, 255, 0);
  // bSpeed = map(throttle, 0, 100, 100, 90);
  HallState1 = digitalRead(2); // Hall 1
  HallState2 = digitalRead(3); // Hall 2
  HallState3 = digitalRead(4); // Hall 3
  HallVal = (HallState1) + (2*HallState2) + (4*HallState3); //Computes the binary value of the 3
  Hall sensors
  Serial.println(mSpeed);
  Serial.println(HallVal);
  delay(100);
  digitalWrite (5,HIGH);
  digitalWrite (6,HIGH);
  digitalWrite (7,HIGH);
  digitalWrite (9,HIGH);
  digitalWrite (10,HIGH);
  digitalWrite (11,HIGH);
```





```
if (throttle > 250) {
  switch (HallVal)
  {
    case 5:
      analogWrite (9, 255);
      digitalWrite (5, HIGH);
      analogWrite (10, mSpeed);
      digitalWrite (6, HIGH);
      analogWrite (11, 255);
      digitalWrite (7, LOW);
      break;
    case 1:
      analogWrite (9, mSpeed);
      digitalWrite (5, HIGH);
      analogWrite (10, 255);
      digitalWrite (6, HIGH);
      analogWrite (11, 255);
      digitalWrite (7, LOW);
      break;
    case 3:
      analogWrite (9, mSpeed);
      digitalWrite (5, HIGH);
      analogWrite (10, 255);
      digitalWrite (6, LOW);
      analogWrite (11, 255);
      digitalWrite (7, HIGH);
      break;
    case 2:
      analogWrite (9, 255);
      digitalWrite (5, HIGH);
      analogWrite (10, 255);
      digitalWrite (6, LOW);
      analogWrite (11, mSpeed);
      digitalWrite (7, HIGH);
      break;
    case 6:
      analogWrite (9, 255);
      digitalWrite (5, LOW);
      analogWrite (10, 255);
      digitalWrite (6, HIGH);
      analogWrite (11, mSpeed);
      digitalWrite (7, HIGH);
      break;
    case 4:
      analogWrite (9, 255);
      digitalWrite (5, LOW);
      analogWrite (10, mSpeed);
      digitalWrite (6, HIGH);
      analogWrite (11, 255);
      digitalWrite (7, HIGH);
      break;
  }
}
else {
  switch (HallVal)
  {
    case 5:
      digitalWrite (5, HIGH);
```

```
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
case 1:
    digitalWrite (5, HIGH);
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
case 3:
    digitalWrite (5, HIGH);
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
case 2:
    digitalWrite (5, HIGH);
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
case 6:
    digitalWrite (5, HIGH);
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
case 4:
    digitalWrite (5, HIGH);
    analogWrite (9, 255);
    digitalWrite (6, HIGH);
    analogWrite (10, 255);
    digitalWrite (7, HIGH);
    analogWrite (11, 255);
    break;
}
}
}
```

Lampiran 2 Foto-foto Dokumentasi

| | |
|---|---|
|  | <p>Pengujian input gate driver gate mosfet</p> |
|  | <p>Pengujian tegangan output driver gate mosfet</p> |
|  | <p>Pengujian Throttle control</p> |

| | |
|---|------------------------------------|
|  | <p>BLDC motor</p> |
|  | <p>Hall sensor pada BLDC motor</p> |
|  | <p>Throttle controll</p> |

| | |
|---|--|
|  A photograph showing a person in a workshop setting, focused on adjusting the steering mechanism of a bicycle. The person is wearing a dark long-sleeved shirt and is positioned behind the front of the bike. The workshop is filled with various tools and equipment, and a date stamp 'Nov 20, 2015' is visible in the top right corner of the image. | <p>Proses Pemasangan Steering</p> |
|  A photograph of a person installing a motor onto a bicycle frame. The person is wearing a white t-shirt and is leaning over the bike. The frame has several stickers, including 'KATANA ALUMINIUM', 'BNJ mandiri', and a large number '307'. The motor is being mounted onto the frame, and the person is using their hands to secure it. | <p>Pemasangan Motor</p> |
|  A close-up photograph showing a hand adjusting a component on a bicycle frame. The component appears to be a sensor or a small motor, and the hand is using a tool or a screwdriver to make adjustments. The background shows the frame and other parts of the bicycle. | <p>Reset Watt Meter</p> |
|  A photograph of a blue 'Watt Meter' device mounted on a bicycle frame. The device has a green LCD screen displaying the word 'WATT'. Below the screen, there are some technical specifications, including 'CE', 'V', and '0-100A'. The device is mounted on a black component, possibly a motor or a sensor, and the background shows the frame and other parts of the bicycle. | <p>Watt Meter yang Sudah Di Rreset</p> |

| | |
|---|--|
|  | <p>Penarikan Throttle saat pengujian tanpa beban</p> |
|  | <p>Proses pengujian tanpa beban</p> |
|  | <p>Pengujian dengan beban</p> |
|  | <p>Prototipe mobil listrik</p> |

Lampiran 3 Tabel Pengujian Dengan Beban Pada Satu Putaran Lap

| Waktu detik | Arus (Amper) | Tegangan (Volt) | Daya (Wat) | Kondisi Jalan |
|----------------|-----------------|--------------------|---------------|--|
| 1 | 5.30 | 36.50 | 193.45 | Kondisi Jalan Pada awal star menanjak sepanjang 60 meter menggunakan arus yang besar karena starting awal membutuhkan torsi yang besar |
| 2 | 4.50 | 37.39 | 168.26 | |
| 3 | 3.97 | 37.26 | 147.92 | |
| 4 | 2.38 | 37.24 | 88.63 | |
| 5 | 2.36 | 37.15 | 87.67 | |
| 6 | 2.11 | 37.10 | 78.28 | |
| 7 | 2.11 | 37.17 | 78.43 | |
| 8 | 2.58 | 37.04 | 95.56 | |
| 9 | 2.23 | 37.05 | 82.62 | |
| 10 | 2.29 | 37.04 | 84.82 | |
| 11 | 1.63 | 37.21 | 60.65 | |
| 12 | 1.03 | 37.33 | 38.45 | |
| 13 | 0.98 | 37.34 | 36.59 | |
| 14 | 1.33 | 37.20 | 49.48 | |
| 15 | 1.34 | 37.31 | 50.00 | |
| 16 | 1.11 | 37.33 | 41.44 | |
| 17 | 1.07 | 37.37 | 39.99 | Kondisi jalan melewati turunan tepatnya di depan perum dosen, posisi throttle di usahakan konstan mengikuti putaran motor terhadap poros roda. Pada kondisi jalan menurun penggunaan arus yang menuju motor semakin kecil dikarenakan kondisi motor tidak membutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan mobil. |
| 18 | 0.60 | 37.47 | 22.48 | |
| 19 | 0.57 | 37.49 | 21.18 | |
| 20 | 0.52 | 37.50 | 19.65 | |
| 21 | 0.48 | 37.55 | 18.14 | |
| 22 | 0.44 | 37.63 | 16.63 | |
| 23 | 0.40 | 37.66 | 15.10 | |
| 24 | 0.36 | 37.67 | 13.56 | |
| 25 | 0.32 | 37.69 | 12.02 | |
| 26 | 0.48 | 37.69 | 18.20 | |
| 27 | 0.44 | 37.70 | 16.66 | |
| 28 | 0.40 | 37.70 | 15.12 | |
| 29 | 0.36 | 37.79 | 13.60 | |
| 30 | 0.32 | 37.81 | 12.06 | |
| 31 | 0.28 | 37.82 | 10.51 | |
| 32 | 0.24 | 37.04 | 8.78 | |
| 33 | 0.32 | 37.04 | 11.82 | |
| 34 | 0.28 | 37.04 | 10.30 | |
| 35 | 0.24 | 37.88 | 8.98 | |
| 36 | 0.52 | 37.89 | 19.85 | |
| 37 | 0.48 | 37.89 | 18.30 | |

| | | | | |
|----|------|-------|--------|--|
| 38 | 0.44 | 37.90 | 16.75 | |
| 39 | 0.40 | 37.92 | 15.21 | |
| 40 | 0.36 | 37.92 | 13.65 | |
| 41 | 0.32 | 37.93 | 12.10 | |
| 42 | 0.48 | 37.93 | 18.32 | |
| 43 | 0.44 | 37.94 | 16.77 | |
| 44 | 0.52 | 37.94 | 19.88 | |
| 45 | 0.48 | 37.95 | 18.33 | |
| 46 | 0.44 | 37.95 | 16.77 | |
| 47 | 0.40 | 37.96 | 15.22 | |
| 48 | 0.36 | 37.96 | 13.67 | |
| 49 | 0.32 | 37.97 | 12.11 | |
| 50 | 0.48 | 37.94 | 18.33 | |
| 51 | 0.44 | 37.93 | 16.77 | |
| 52 | 0.44 | 37.92 | 16.76 | |
| 53 | 0.54 | 37.83 | 20.43 | |
| 54 | 0.71 | 37.78 | 26.82 | |
| 55 | 1.78 | 37.52 | 66.79 | |
| 56 | 1.01 | 37.50 | 37.88 | |
| 57 | 2.21 | 37.32 | 82.48 | |
| 58 | 2.91 | 37.10 | 107.96 | |
| 59 | 2.54 | 37.10 | 94.23 | |
| 60 | 2.35 | 37.18 | 87.37 | |
| 61 | 2.07 | 37.21 | 77.02 | |
| 62 | 1.90 | 37.25 | 70.78 | |
| 63 | 1.24 | 37.23 | 46.17 | |
| 64 | 1.52 | 37.21 | 56.56 | |
| 65 | 1.46 | 37.32 | 54.49 | |
| 66 | 0.92 | 37.40 | 34.41 | |
| 67 | 0.37 | 37.41 | 13.84 | |
| 68 | 1.28 | 37.36 | 47.82 | |
| 69 | 1.19 | 37.39 | 44.49 | |
| 70 | 1.16 | 37.40 | 43.38 | |
| 71 | 1.78 | 37.25 | 66.31 | |
| 72 | 2.16 | 37.16 | 80.27 | |
| 73 | 2.07 | 37.18 | 76.96 | |
| 74 | 1.88 | 37.20 | 69.94 | |
| 75 | 1.98 | 37.15 | 73.56 | |
| 76 | 2.17 | 37.10 | 80.51 | |
| 77 | 2.07 | 37.12 | 76.84 | |
| 78 | 2.49 | 36.90 | 91.88 | |
| | | | | Melewati jalan lurus tepatnya di depan gedung N-UNJ, Kemudian di susul dengan belokan di depan gedung M-UNJ. Pada jalan ini penggunaan arus meningkat dari sebelumnya karena motor membutuhkan torsi untuk menggerakkan beban pada jalan mendatar dan ketika memasuki belokan, perilaku pengendara mengurangi tarikan throttle dan melakukan pengereman yang mengakibatkan penurunan arus. |
| | | | | Melewati jalanan lurus tepatnya di depan gedung Pasca Sarjana UNJ penggunaan arus yang di pakai antara 1-2 amper, perubahan arus terjadi walaupun dalam jalanan lurus dikarenakan perilaku pengemudi dalam pembukaan throttle tidak konstan akibat dari getaran yang ditimbulkan dari kondisi jalan yang kurang halus. |

| | | | | |
|-----|------|-------|--------|---|
| 79 | 2.29 | 37.04 | 84.82 | |
| 80 | 1.81 | 37.10 | 67.15 | |
| 81 | 1.99 | 37.10 | 73.83 | |
| 82 | 1.96 | 37.12 | 72.76 | |
| 83 | 1.94 | 37.10 | 71.97 | |
| 84 | 1.96 | 37.12 | 72.76 | |
| 85 | 1.93 | 37.12 | 71.64 | |
| 86 | 2.63 | 36.91 | 97.07 | |
| 87 | 2.85 | 36.95 | 105.31 | |
| 88 | 2.38 | 36.97 | 87.99 | |
| 89 | 1.95 | 37.05 | 72.25 | |
| 90 | 2.03 | 37.05 | 75.21 | |
| 91 | 1.50 | 37.16 | 55.74 | |
| 92 | 1.35 | 37.20 | 50.22 | |
| 93 | 1.79 | 37.16 | 66.52 | |
| 94 | 1.65 | 37.16 | 61.31 | |
| 95 | 0.32 | 37.46 | 11.99 | Terjadi penurunan arus pada jalan lurus dikarenakan terjadi proses pengereman kendaraan karena melewati jalanan berlubang tepatnya di depan gedung Elektro UNJ. |
| 96 | 0.73 | 37.39 | 27.29 | |
| 97 | 0.30 | 37.48 | 11.24 | |
| 98 | 0.07 | 37.59 | 2.63 | |
| 99 | 0.05 | 37.64 | 1.88 | |
| 100 | 0.11 | 37.65 | 4.14 | |
| 101 | 0.11 | 37.65 | 4.14 | |
| 102 | 1.15 | 37.41 | 43.02 | |
| 103 | 1.17 | 37.37 | 43.72 | |
| 104 | 1.48 | 37.27 | 55.16 | |
| 105 | 1.68 | 37.25 | 62.58 | Disusul dengan jalan lurus dari depan gedung Elektro menuju arah Fakultas Ilmu Sosial UNJ. Penggunaan arus antara 1-2 amper |
| 106 | 2.27 | 37.12 | 84.26 | |
| 107 | 2.08 | 37.18 | 77.33 | |
| 108 | 1.82 | 37.16 | 67.63 | |
| 109 | 1.37 | 37.26 | 51.05 | |
| 110 | 1.52 | 37.21 | 56.56 | |
| 111 | 1.70 | 37.22 | 63.27 | |
| 112 | 1.03 | 37.34 | 38.46 | |
| 113 | 1.32 | 37.34 | 49.29 | |
| 114 | 1.06 | 37.24 | 39.47 | |
| 115 | 2.07 | 37.16 | 76.92 | |
| 116 | 1.66 | 37.20 | 61.75 | |
| 117 | 2.49 | 36.98 | 92.08 | |
| 118 | 1.84 | 37.10 | 68.26 | |
| 119 | 2.17 | 37.02 | 80.33 | |

| | | | | |
|-----|------|-------|--------|---|
| 120 | 1.83 | 37.11 | 67.91 | |
| 121 | 2.71 | 36.92 | 100.05 | |
| 122 | 2.09 | 37.02 | 77.37 | |
| 123 | 2.07 | 37.01 | 76.61 | |
| 124 | 1.88 | 37.09 | 69.73 | |
| 125 | 0.86 | 37.29 | 32.07 | Melewati belokan di depan Gedung FBS-UNJ penggunaan arus menurun karena mengalami pengereman dan pengurangan bukaan throttle |
| 126 | 0.84 | 37.31 | 31.34 | |
| 127 | 0.71 | 37.45 | 26.59 | |
| 128 | 0.72 | 37.41 | 26.94 | |
| 129 | 0.93 | 37.33 | 34.72 | |
| 130 | 1.18 | 37.34 | 44.06 | |
| 131 | 1.21 | 37.32 | 45.16 | Melewati jalanan lurus menuju pintu gerbang keluar parkir mobil UNJ. Prilaku pengendara berusaha membuka tarikan <i>throttle</i> dikarenakan kondisi jalan sedikit menanjak dan tidak lurus sempurna sehingga terjadi kenaikan arus yang konstan di 2 amper |
| 132 | 1.51 | 37.22 | 56.20 | |
| 133 | 1.98 | 37.12 | 73.50 | |
| 134 | 2.45 | 37.00 | 90.65 | |
| 135 | 1.99 | 37.05 | 73.73 | |
| 136 | 1.94 | 37.06 | 71.90 | |
| 137 | 2.48 | 36.96 | 91.66 | |
| 138 | 1.69 | 37.05 | 62.61 | |
| 139 | 1.96 | 37.02 | 72.56 | |
| 140 | 2.00 | 37.02 | 74.04 | |
| 141 | 2.41 | 36.95 | 89.05 | |
| 142 | 1.90 | 37.03 | 70.36 | |
| 143 | 1.49 | 37.11 | 55.29 | |
| 144 | 1.58 | 37.08 | 58.59 | |
| 145 | 2.25 | 36.99 | 83.23 | |
| 146 | 2.54 | 36.96 | 93.88 | |
| 147 | 3.06 | 36.00 | 110.16 | |
| 148 | 3.00 | 36.50 | 109.50 | |
| 149 | 2.90 | 36.60 | 106.14 | |
| 150 | 2.90 | 36.77 | 106.63 | |
| 151 | 2.73 | 36.86 | 100.63 | |
| 152 | 2.70 | 36.89 | 99.60 | |
| 153 | 2.69 | 36.70 | 98.72 | |
| 154 | 2.52 | 36.85 | 92.86 | |
| 155 | 2.57 | 36.79 | 94.55 | |
| 156 | 2.91 | 36.74 | 106.91 | |
| 157 | 2.76 | 36.73 | 101.37 | |
| 158 | 2.29 | 36.86 | 84.41 | |
| 159 | 2.29 | 36.86 | 84.41 | |
| 160 | 2.19 | 36.89 | 80.79 | |

| | | | | |
|-----|------|-------|-------|--|
| 161 | 2.64 | 36.84 | 97.26 | |
|-----|------|-------|-------|--|

Rata-Rata Arus : 57.01724 A
Penggunaan Daya Per Jam Wh) : 2.549938 Wh

Lampiran 4 Algoritma Six Step Comutation

3-Phase BLDC Drive Using Variable DC Link Six-Step Inverter

Designer Reference Manual

56800E
16-bit Digital Signal Controllers

DRM078
Rev. 1
05/2006

freescale.com

 **freescale**[™]
semiconductor

System Concept

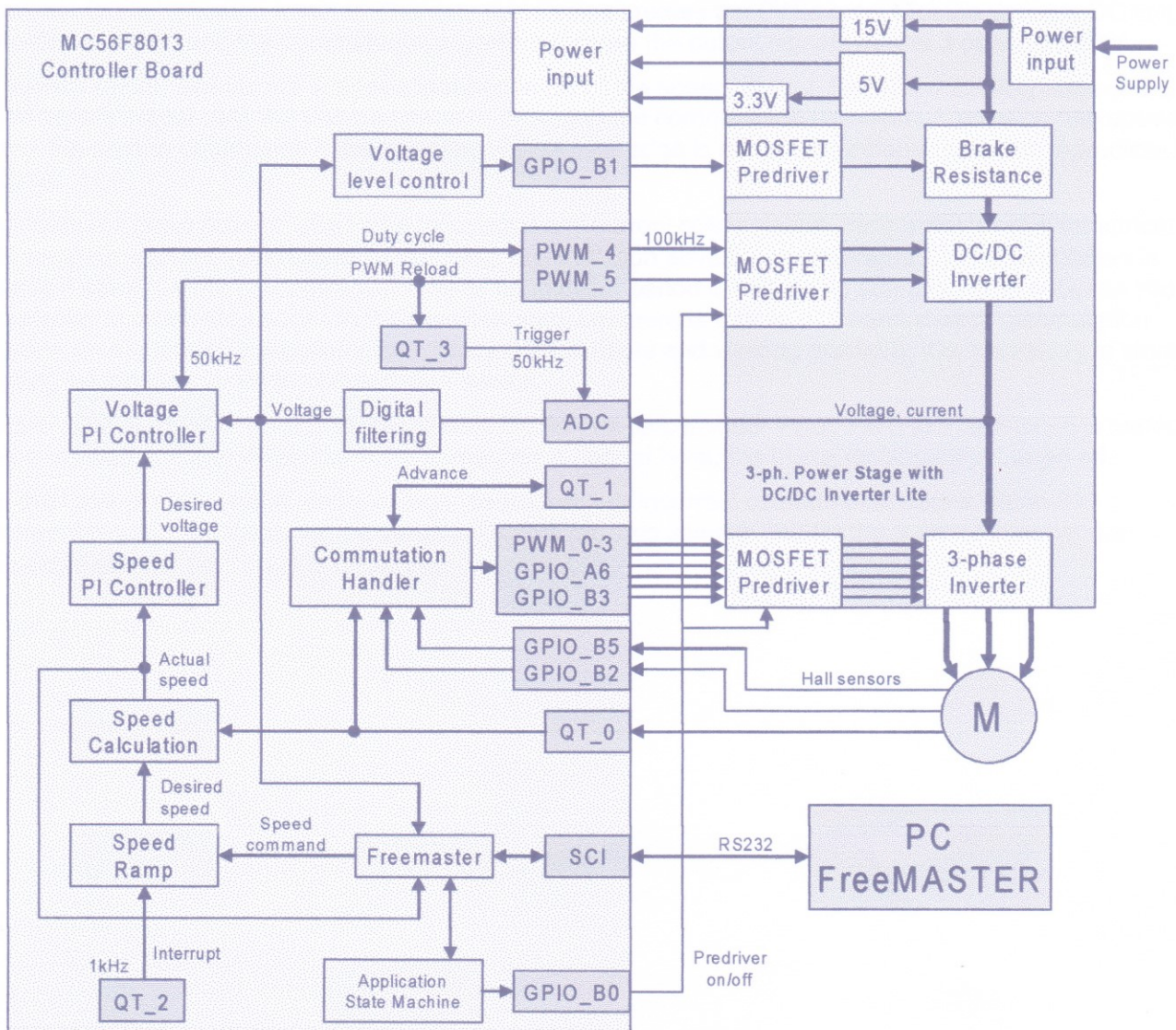


Figure 3-1. System Concept

3.3 Control Process

The state of the user interface is scanned periodically, while the speed of the motor is measured on each new arriving edge from the Hall sensors (only one phase is used for speed measurement). The speed command is calculated, according to the state of the control signals (Start/Stop, Speed from FreeMASTER). Then the speed command is processed by means of the speed ramp algorithm. The comparison between the actual speed command obtained from the ramp algorithm output and the measured speed generates a speed error. The speed error is input to the speed PI controller, generating a new desired voltage level for the voltage PI controller. The ADC is used to measure voltage at the variable DC link six-step inverter output and a digital filter is applied to this value. Then the filtered voltage is fed to the voltage PI controller. The comparison between the measured and desired voltages generates a voltage error. The voltage error is input to the voltage PI controller, generating a new duty cycle for the

Control Process

variable DC link six-step inverter. The duty cycle value creates the PWM output for the variable DC link six-step inverter, and the commutation algorithm creates the output signals for the 3-phase inverter.

The Hall sensor signals are scanned independently of the speed control. Each new arriving edge of any Hall sensor signal calls the interrupt routine, providing the commutation algorithm. From a certain speed level the routine determines if the incoming Hall sensor edge is correct, by comparing it with a predicted signal.

As there is a delay between the Hall sensor edge and current commutation, the current is not symmetrical. To keep the current symmetrical, a so-called commutation advance is generated. The commutation is applied using a timer countdown. The timer countdown period is calculated using the time between two particular commutation edges in the previous step, i.e. there is a table of times for each commutation sector. Owing to motor geometry inaccuracy (Hall sensors and winding position), it is necessary to store timing information for each commutation sector.

In the case of a higher voltage at the variable DC link six-step inverter input, the brake resistance is turned on to reduce voltage. When the voltage reaches a normal level, the brake resistance is turned off.

In the case of overvoltage, undervoltage, overcurrent or incorrect commutation edges within 200 commutations, the signals for the variable DC link six-step inverter and for the 3-phase inverter are disabled and the fault state is displayed.

5.3 Software Implementation

The general software diagram incorporates the main routine (Main) entered from reset and the interrupt states (see Figure 5-3).

The main routine initializes the digital signal controller and the application, then it enters an infinite background loop. The background loop contains an application state machine.

The following interrupt service routines are utilized:

- PWM reload – voltage PI controller calculation and ADC references processing, PWM update
- ADC conversion complete – reads and filters measured values, braking resistance and fault control
- Timer 0 input capture and overflow – commutation and speed calculation
- GPIO B5 and B2 – commutation
- Timer 2 compare – speed PI controller calculation, ramp calculation
- Timer 1 compare – commutation advance
- SCI – services communication with the FreeMASTER software

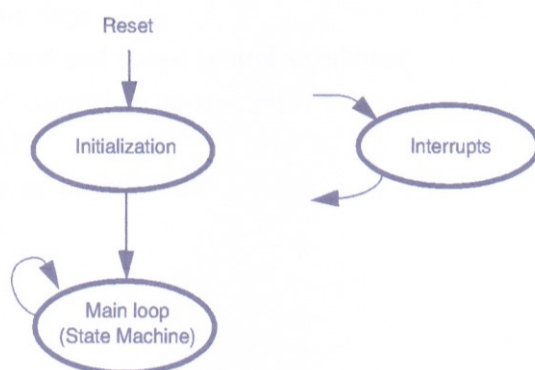


Figure 5-3. State Diagram — General Overview

5.3.1 Initialization

The Main routine initializes the DSP:

- Disables interrupts
- Initializes PLL
- Disables COP and LVI
- Initializes the system integration module
 - enables PWM, SCI, timer, ADC modules
 - connects the timer 3 input to the PWM reload_sync signal
 - sets the timer clock source to 1x bus clock
 - sets the PWM clock source to 3x bus clock
- Initializes GPIO A and B modules
 - GPIO A6 and B3 as outputs for PWM 4 and 5 MOSFETs
 - GPIO B2 and B5 as inputs for Hall sensor signals
 - GPIO B0 as the output for the brake resistance control

Software Design

- Initializes the SCI for FreeMASTER communication
- Initializes the interrupt controller
- Initializes the ADC
- Initializes timer 3 for ADC sync to PWM reload
- Initializes timer 1 for commutation advance
- Initializes timer 0 for commutation and speed evaluation
- Initializes the PWM module:
 - Edged-aligned independent PWM mode, positive polarity
 - PWM modulus 960 – defines the PWM frequency as 100kHz
 - PWM reload – every opportunity
 - Channels 0 – 3 for the 3-phase inverter MOSFETs
 - Channels 4 – 5 for the variable DC link six-step inverter MOSFETs
- Initializes the voltage PI controller parameters
- Reads the Hall sensors signals and evaluates the rotor position
- Clears GPIO B pending flags
- Initializes timer 2 for ramp and speed control algorithms
- Initializes the speed PI controllers parameters
- Initializes FreeMASTER
- Pre-sets the first state as the INIT state
- Enables the interrupts

5.3.2 Interrupts

The interrupts have the following functions:

- PWM reload interrupt – triggered every PWM reload. On an even occurrence, the ADC zero references are updated in the ADC offset registers and the voltage PI controller is calculated. PWM channels 4 and 5 are updated by the duty cycle, calculated by the PI controller. The ADC is enabled so as to start in the next state. On an odd occurrence, the voltage and current ADC zero references are read and filtered.
- ADC conversion complete interrupt – the ADC is stopped for the next state. The variable DC link six-step inverter output voltage is read and filtered. Then, depending on the odd or event state, either the DC bus input voltage or the motor current is read and filtered. The overvoltage and undervoltage flags are generated according to the measured voltage level, and/or the overcurrent flag is generated according to the measured motor current level. Brake resistance is turned on and off depending on the DC bus voltage level.
- Quad timer 0 interrupt – this interrupt has two sources. One of them is the overflow event. In this event, the routine will remember that the timer overflowed, as information for further speed calculation. The other source is the input capture signal. This event is used for commutation and also for the speed calculation. This routine also saves the Hall sensor edge time of each sensor and uses it to calculate the time of the next advanced commutation.
- GPIO B interrupt – this interrupt routine has two sources, pins 5 and 2. Both are connected to the Hall sensor signals and serve for commutation.

Software Implementation

- Quad timer 2 interrupt – this interrupt is generated every 1 ms. It generates the speed ramp and calculates the speed PI controller. It also turns on and off the commutation control features, such as prediction of the next Hall sensor state and commutation advance control.
- Quad timer 1 interrupt – this interrupt occurs when the timer reaches the preset compare value loaded in the quad timer 0 interrupt. This compare event causes advanced commutation and calculates the time of the next advanced commutation, for the case where the Hall sensor edge does not arrive in the next state.

5.3.3 Drive State Machine

The drive can be in one of the following states, illustrated in Figure 5-4, also showing transition conditions among the drive states.

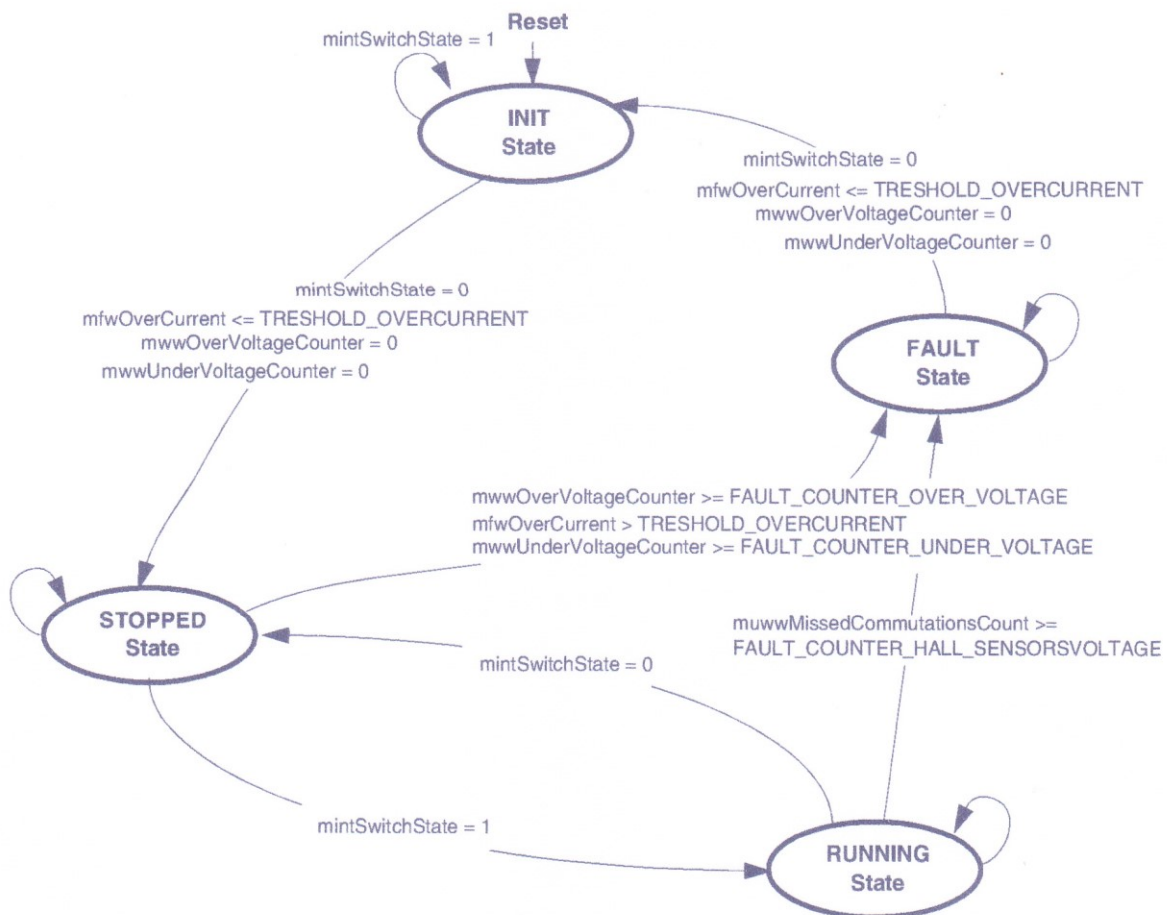


Figure 5-4. Drive State Machine Transitions