

LAPORAN TUGAS AKHIR 2

MiniCont-EV: Mini *Controller* Untuk *Electric Vehicle* Daya Rendah



Penyusun:

Agus Setiawan (20524063)

Muhammad Alvin (20524070)

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta

2024

HALAMAN PENGESAHAN

MiniCont-EV : *Mini Controller Berdaya Rendah untuk Kendaraan Listrik*

Penyusun:

Agus Setiawan (20524063)

Muhammad Alvin (20524070)

Yogyakarta, 8 Juli 2024

Dosen Pembimbing 1



Dr. Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng.
NIP 985240104

Dosen Pembimbing 2



Husein Mubarak, S.T., M.Eng.
NIP 155241305

**Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

2024

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

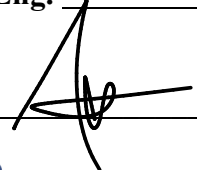
MiniCont-EV: Mini *Controller* Untuk *Electric Vehicle* Daya Rendah



Ketua Penguji

: Dr. Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng. 

Anggota Penguji 1

: Iftitah Imawati, S.T., M.Eng. 


Anggota Penguji 2

: I Gede Sudiasa, S.T. 

Tugas akhir ini telah disahkan sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

5 Agustus 2024

Ketua Program Studi Teknik Elektro




Dwi Ana Ratna Wati, S.T., M.Eng.

035240102

PERNYATAAN

Dengan ini kami menyatakan bahwa:

1. Tugas Akhir ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi lainnya, dan sepanjang pengetahuan kami juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Tugas Akhir yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak, yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal ini, penggunaan informasi dan materi Tugas Akhir terkait paten maka akan didiskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut di atas.

Yogyakarta, 5 Agustus 2024

Agus Setiawan (20524063)



Muhammad Alvin (20524070)



DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
DAFTAR ISI	iv
RINGKASAN	vi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang dan Identifikasi Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Batasan Realistis Aspek Keteknikan	3
BAB 2 IDENTIFIKASI KEBUTUHAN SISTEM	4
2.1. Studi Literatur dan Observasi	4
2.2. Dasar Teori.....	5
2.2.1. <i>BLDC</i>	5
2.2.2. <i>Control</i>	7
2.2.3. <i>Positioning Control of BLDC</i>	9
2.2.4. <i>Full Bridge Inverter</i>	10
2.2.5. Perhitungan TKDN	12
2.3. Standar Keteknikan.....	12
2.4. Analisis Stakeholder	14
2.5. Analisis Aspek yang Mempengaruhi Sistem	14
2.6. Spesifikasi Sistem	15
BAB 3 USULAN SOLUSI	16
3.1. Usulan pertama: <i>BLDC Mini Controller</i> dengan Hall Sensor	16
3.1.1. Desain <i>BLDC Mini Controller</i> Dengan Hall Sensor.....	16
3.1.2. Rencana Anggaran Desain Sistem 1	18
3.1.3. Analisis Risiko Desain 1	19
3.1.4. Pengukuran Performa Desain 1	20
3.1.5. Usulan kedua: <i>BLDC mini Controller</i> dengan metode Sensorless	20

3.2.	Desain Sistem 2.....	21
3.2.1.	Rencana Anggaran Desain 2.....	21
3.2.2.	Analisis Risiko Desain 2.....	23
3.2.3.	Pengukuran Performa Desain 2	23
3.3.	Analisis dan Penentuan Usulan Solusi/Desain Terbaik	24
3.4.	Gantt <i>Chart</i>	24
3.5.	Realisasi Pelaksanaan Tugas Akhir 1	25
BAB 4 HASIL RANCANGAN DAN METODE PENGUKURAN		27
4.1.	Hasil Rancangan Sistem	27
4.1.1.	Rangkaian Elektronik.....	27
4.1.2.	Hardware Hasil Perancangan.....	28
4.2.	Metode Pengukuran Kinerja Hasil Perancangan	30
4.2.1.	RPM (<i>Rotation Per minute</i>).....	30
4.2.2.	Daya Listrik	30
4.2.3.	Komutasi Sinyal 3 fasa	31
BAB 5 HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS.....		32
5.1.	Analisis Hasil	32
5.1.1.	Hasil dan Analisis Pengujian Indikator.....	32
5.1.2.	Pemenuhan Spesifikasi Sistem	39
5.1.3.	Pengalaman Pengguna	41
5.1.4.	Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya.....	45
5.2.	Dampak Implementasi Sistem	48
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN.....		49
6.1	Kesimpulan	49
6.2	Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....		50
LAMPIRAN.....		52

RINGKASAN

Ketergantungan energi fosil pada kendaraan mendorong Tugas Akhir ini untuk merancang solusi alternatif sebagai salah satu alternatif pengganti kendaraan berbahan bakar fosil. Selain itu peningkatan penggunaan kendaraan listrik mendorong pemerintah untuk mengeluarkan regulasi peningkatan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) untuk kendaraan listrik. Solusi yang diusulkan untuk masalah tersebut adalah desain Minicont-EV (mini *controller* dengan daya rendah) untuk mendukung kebijakan pemerintah tentang kendaraan listrik. Sistem yang digunakan untuk Minicont-EV menggunakan keluaran 3 fasa dengan sistem sensor sebagai *feedback closed loop*. Hasil rancangan menunjukkan bahwa kecepatan *output* maksimum adalah 465 RPM yang masih di bawah usulan solusi. Selain itu TKDN dari produk Minicont-EV memiliki persentase 63.5% yang mana sudah sesuai dengan nilai minimum TKDN oleh peraturan perindustrian.

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang dan Identifikasi Masalah

Sebagian besar sumber daya alam yang digunakan di Indonesia adalah energi tak terbarukan. Penggunaan energi tersebut terus meningkat dari tahun ke tahun. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) suplai energi pada tahun 2022 meningkat sebesar 19% dari tahun sebelumnya. Peningkatan energi didominasi oleh batu bara sebesar 42,38%, minyak bumi 31,40%, dan Energi Baru Dan Terbarukan (EBT) sebesar 12,30% [1]. Peningkatan penggunaan energi minyak bumi dan Batu bara melebihi kecepatan pertumbuhan EBT, hal ini menunjukkan angka ketergantungan terhadap energi tak terbarukan masih tinggi. Di samping itu, EBT merupakan alternatif yang terus didukung oleh pemerintah untuk menyelesaikan masalah ketergantungan energi fosil seperti batu bara dan minyak bumi. EBT dapat mengurangi biaya impor minyak bumi dan batu bara. Selain itu, perkembangan teknologi di bidang transportasi yang memanfaatkan energi terbarukan semakin mendorong pemerintah untuk menyesuaikan kebijakan penggunaan energi.

Keadaan iklim dan krisis energi mendorong beberapa negara di dunia menerapkan kebijakan kendaraan listrik. Berdasarkan data dari *International Energy Agency (IEA)*, penggunaan mobil listrik telah mencapai 5,1 juta pada tahun 2018 dan mengalami peningkatan sebesar 2 juta pada tahun sebelumnya [2]. Sedangkan di Indonesia, Presiden Joko Widodo mencanangkan program hilirisasi produk nikel untuk mendukung pangsa pasar kendaraan listrik dalam negeri [2]. Pemerintah menilai, penggunaan kendaraan listrik dapat membantu menyelesaikan masalah polusi pada beberapa kota besar dan dapat mengurangi perubahan iklim secara drastis. Kendaraan listrik baterai memiliki kelebihan dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar minyak karena kendaraan listrik baterai tidak menghasilkan polutan seperti CO, NO_x, HC, SO₂, dan PM [3].

Di samping itu, adanya peningkatan penggunaan kendaraan listrik juga mendorong pemerintah untuk meningkatkan kemampuan produksi produk dalam negeri seperti kendaraan listrik. Berdasarkan peraturan pemerintah No. 29 Tahun 2018 tentang Pemberdayaan Industri, Produk Dalam Negeri (PDN), Pemerintah mendorong bisnis Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) untuk dapat meningkatkan nilai serapan dalam negeri baik jasa maupun barang. Hal ini memicu perkembangan dalam produksi kendaraan listrik yang masih didominasi oleh barang dan jasa yang tidak menyerap sumber daya dalam negeri.

Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) adalah besarnya komponen dalam negeri pada barang, jasa dan gabungan barang dan jasa. Nilai TKDN yang dihitung pada kendaraan listrik meliputi komponen utama baterai rangka, motor penggerak dan *controller* [4]. Nilai TKDN setiap komponen akan digabung dari persentase minimum dalam perakitan sebesar 20%, bahan baku 40 %, dan jasa sebesar 30%. Persentase TKDN tersebut, akan naik tiap tahunnya sehingga perlu pengembangan lanjut dalam kemampuan produksi dalam negeri [5].

Komponen utama kendaraan listrik terdiri dari baterai, motor listrik dan *unit* kendalinya. Ketiga komponen utama tersebut memiliki kandungan TKDN yang masih rendah. Salah satu potensi yang dapat dinaikkan nilai TKDN nya adalah komponen pengendali kendaraan listrik. Hal tersebut didukung oleh ketersediaan komponen yang dapat diperoleh di dalam negeri dan kesiapan sumber daya manusia (SDM) yang telah mumpuni.

Berdasarkan kemampuan SDM, ketersediaan komponen dan masalah serapan nilai dalam negeri tersebut, maka proposal ini memberikan pendekatan masalah melalui perancangan *mini controller* untuk mengurangi ketergantungan barang dan jasa yang masih didominasi non serapan dalam negeri. *Mini controller* ini dapat mendorong perkembangan teknologi kendaraan listrik dalam negeri untuk menyerap lebih banyak nilai dalam ekonomi dalam negeri. Sehingga dapat membantu pemerintah dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi pada krisis energi dan lemahnya ekonomi. *Tabel 1.1* merupakan ringkasan hasil survei terhadap kondisi dan kesiapan implementasi TKDN dalam kendaraan listrik.

Tabel 1.1 Hasil survei antara pengembang dan pengguna

Pertanyaan	Jawaban/tanggapan
Komponen utama yang digunakan?	Ada 3 yaitu baterai, <i>controller</i> dan motor
Kriteria pembelian komponen?	Membeli komponen berdasarkan kebutuhan Menyusun ukuran spesifikasi
Komponen yang memiliki TKDN ?	Belum ada sertifikat TKDN
Apakah TKDN penting untuk Tim UASC?	Penting, akan tetapi pertimbangan akan efisiensi yang belum maksimal mengakibatkan belum menjadi pilihan utama untuk beberapa parameter tertentu.

1.2. Rumusan Masalah

- Bagaimana sistem pengendali yang digunakan pada *controller* ini dapat berjalan dengan baik ?
- Bagaimana meningkatkan nilai TKDN pada *controller* kendaraan listrik ?

1.3. Tujuan

Capstone design ini diharapkan mendorong pengembangan industri kendaraan listrik. Peningkatan TKDN kendaraan listrik diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada komponen luar negeri untuk merakit kendaraan listrik dalam negeri. Selain itu, dengan mendukung industri dalam negeri pada produksi kendaraan listrik, pemerintah berusaha untuk meningkatkan nilai tambah dalam negeri, menciptakan lapangan kerja, memperkuat perekonomian lokal dan meningkatkan ketertarikan terhadap industri kendaraan listrik ke depannya.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam perancangan ini terfokus pada pengembangan perangkat kendali berukuran mini untuk motor *Brush-Less Direct Current (BLDC)* berdaya rendah pada kendaraan listrik. Perangkat ini akan didesain dengan menyerap jasa dan barang dalam negeri sesuai persentase minimal dari peraturan kementerian perindustrian No. 6 Tahun 2022 yaitu paling rendah 40% . Hal tersebut bertujuan mendukung pertumbuhan industri kendaraan listrik dalam negeri tanpa adanya ketergantungan terhadap produk impor. Tujuan dari perancangan ini adalah perangkat yang dikembangkan mampu mengontrol kecepatan rotasi motor *BLDC* 300 - 500 Watt. Selama proses perancangan, akan dipertimbangkan aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan untuk memastikan keberlanjutan dan manfaatnya dalam ekosistem kendaraan listrik di dalam negeri.

1.5. Batasan Realistis Aspek Keteknikan

- Ukuran daya motor pada kisaran 300 – 500 watt
- Ukuran Tegangan Sistem 48 V
- Digunakan pada sepeda listrik dan *scooter*.
- Dimensi pada kisaran 15 x 10 x 10 cm

BAB 2 IDENTIFIKASI KEBUTUHAN SISTEM

2.1. Studi Literatur dan Observasi

Penelitian tentang pengendalian kecepatan motor *BLDC* telah banyak dilakukan. Metode pengendalian motor *BLDC* menggunakan PID dengan konsep *sensorless* memberikan hasil yang lebih cepat untuk menuju kondisi stabil [1]. Cara kerja konsep *sensorless* adalah menghubungkan sebuah *estimator* pada kabel yang menghubungkan antara *inverter* dengan motor *BLDC*. Estimator kemudian akan membaca arus dan akan memprediksi lokasi magnet berada di mana letaknya pada motor *BLDC*. Metode ini memiliki potensi yang dapat dikembangkan dengan menambahkan sebuah sensor untuk lebih dapat memberikan informasi yang lebih akurat.

Metode pengendalian motor *BLDC* dengan menggunakan *Phase Wide Modulation* (PWM) berbasis Mikrokontroler *Arduino uno* menggunakan sensor *Hall effect* yang dapat memberikan hasil yang lebih akurat dengan rangkaian yang lebih sederhana dari *sensorless*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan motor berkurang secara signifikan apabila dihubungkan dengan beban. Hal tersebut disebabkan oleh ketiadaan sistem pengendali yang bekerja sebagai *feedback* untuk mengoptimalkan kecepatan motor saat di tambahnya beban[6].

Metode pengendalian motor *BLDC* dengan menggunakan algoritma *closed loop* pada mikroprosesornya. Penguji juga menggunakan sensor *Hall effect* dengan alasan yang sama seperti metode sebelumnya. Algoritma *closed loop* dapat menjamin parameter dapat tercapai dengan stabil dengan *error* yang minimal dikarenakan adanya *feedback* yang mengatur *set point* terhadap nilai aslinya.

Tabel 2.1 Ringkasan perkembangan penelitian pengendalian motor *BLDC*

Judul	Usulan solusi	Hasil/Evaluasi (Kelebihan/Kekurangan)
<i>Control BLDC Motor Speed using PID Controller</i> [7]	Solusi yang ditawarkan peneliti adalah metode pengendali <i>PID</i> dan konsep <i>sensorless</i> untuk mengetahui posisi <i>BLDC</i> .	Hasil: Hasil rotasi <i>BLDC</i> mencapai 2500 <i>RPM</i> (<i>Rotation Per Minutes</i>) dan <i>settling time</i> 0.018 detik. Kelebihan: Sistem dapat stabil lebih cepat daripada metode kendali lain saat diberi beban. Kekurangan: Memerlukan rangkaian <i>encoder</i> tambahan untuk membaca sinyal <i>back EMF</i> karena <i>BLDC</i> tidak menggunakan sensor untuk membaca posisi.

<p>Sistem Kendali Kecepatan Motor <i>BLDC</i> Menggunakan <i>PWM</i> Berbasis Mikrokontroler <i>Arduino Uno</i> [8]</p>	<p>Solusi yang ditawarkan peneliti sistem pengendali sederhana menggunakan sinyal <i>PWM</i> pada <i>board Arduino</i> dan sensor <i>Hall effect</i> untuk mengetahui posisi <i>BLDC</i> nya.</p>	<p>Hasil : memiliki nilai <i>RPM</i> maksimum 370 pada tegangan 48 V dan arus 8 A Kelebihan : Menggunakan sensor <i>Hall effect</i> sehingga dapat mengetahui posisi secara akurat dan rangkaian lebih sederhana daripada <i>sensorless</i> Kekurangan : nilai <i>RPM</i> yang dicapai tidak setinggi menggunakan pengendali <i>PID</i>, <i>RPM</i> menurun drastis dan tidak stabil setelah menerima beban.</p>
<p><i>Improved Sensor Control Method for BLDC Motors</i></p>	<p>Solusi yang ditawarkan peneliti merupakan pengendali <i>BLDC</i> menggunakan sensor <i>Hall effect</i> dan algoritma <i>closed loop</i> pada mikroprosesornya.</p>	<p>Hasil : memiliki <i>RPM</i> 3000 pada tegangan 48 V Keunggulan : Sistem pengendali yang digunakan memiliki akurasi sangat tinggi karena digunakan koreksi <i>error</i> pada pembacaan kecepatan <i>output</i> sensor, sehingga <i>RPM</i> dapat mencapai 3000. Kekurangan : Sistem belum memberikan solusi untuk menjaga kestabilan <i>BLDC</i> saat menerima beban.</p>

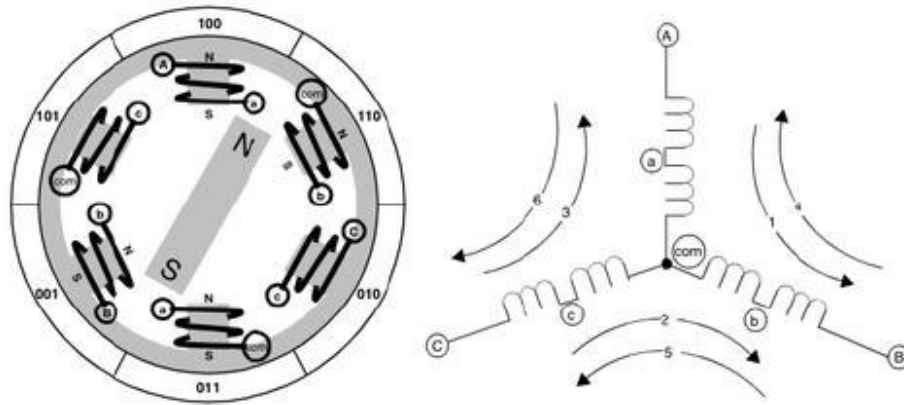
Berdasarkan hasil observasi dan kajian literatur yang telah dilakukan maka penelitian ini akan mendesain sebuah *controller* yang memiliki dimensi dan spesifikasi sesuai dengan kebutuhan stakeholder. Kelebihan *controller* ini terletak pada dimensi yang kecil sehingga tidak memerlukan ruang penempatan dan bobot kendaraan. Selain penggunaan material memiliki kandungan TKDN minimal 40%. Sedangkan dalam metode kendali menggunakan metode *sensored*, sehingga motor lebih stabil pada beban dinamis dibandingkan dengan metode *sensorless*.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. *BLDC*

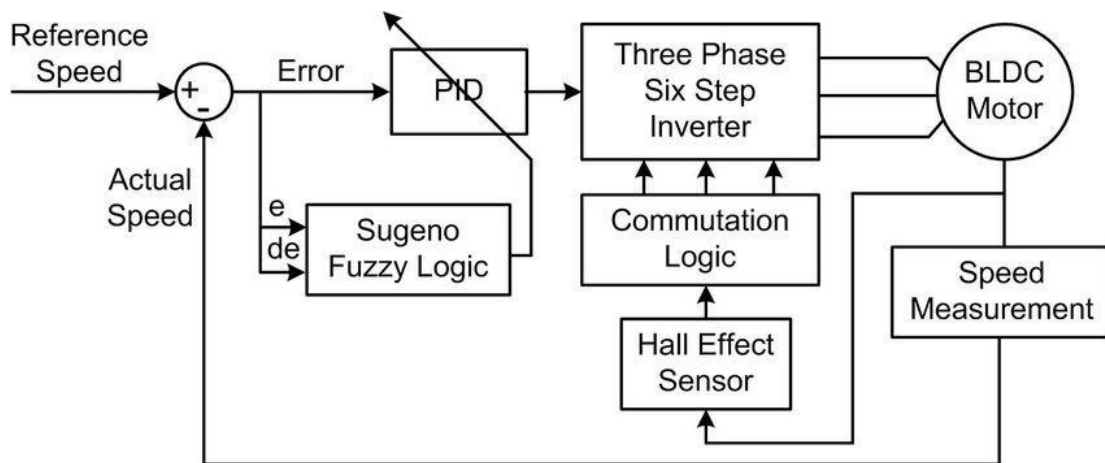
BLDC motor merupakan salah satu tipe motor DC yang menggunakan komutasi sinyal *trapezoidal* maupun sinyal kotak [9] Gambar 2.1. Sedangkan motor DC yang menggunakan sinyal sinus merupakan motor *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) [9]. Sinyal yang digunakan untuk mengendalikan *BLDC* memiliki karakteristik seperti arus tiga fase karena bentuk fisik dari lilitan terbagi menjadi 3 bagian *line*. Karena sifatnya tersebut motor *BLDC* tidak

memerlukan *brush* sehingga memperpanjang umur karena tidak banyak gesekan rotor dan komponen lain [10].



Gambar 2.1 Simplified BLDC Diagram [11]

Dalam aplikasinya, motor *BLDC* yang menerima beban harus dapat menstabilkan putarannya sehingga memerlukan sebuah metode untuk mengetahui posisi rotor terhadap statornya. Metode yang sering dipakai adalah menggunakan sensor dan tanpa sensor. Melalui sebuah sensor *Hall effect*, dapat diketahui posisi kutub rotornya dengan menghitung perubahan tegangan sensor karena perubahan medan magnet[12]. Sedangkan untuk metode *sensorless* digunakan pembacaan arus yang berubah saat motor *BLDC* memiliki nilai *Back Electromotive Force* (EMF). Metode ini memerlukan sebuah *encoder* untuk mengubah nilai pembacaan sensor menjadi sinyal logika yang akan digunakan untuk menyinkronkan putaran *BLDC* dengan komutasi yang sedang dilakukan [13].

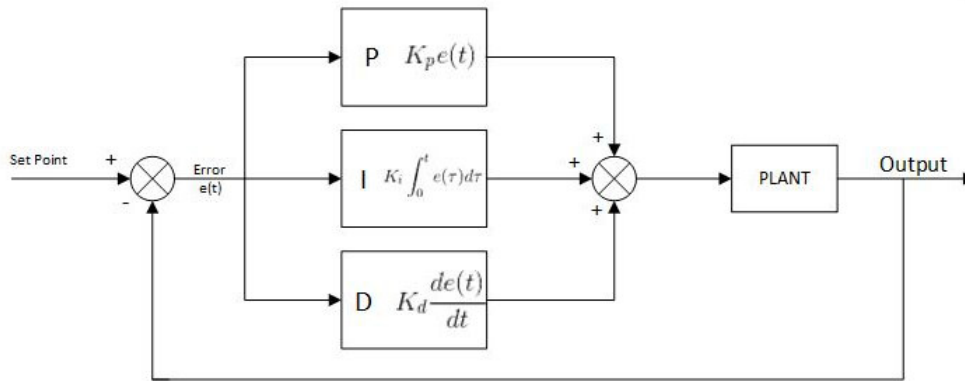


Gambar 2.2 Blok diagram kerja BLDC [14]

Motor *BLDC* memerlukan sistem pengendali yang mengatur tegangan setiap *line* fase nya. Pengaturan tegangan ini dapat dilakukan menggunakan *gate driver* seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 2.1. Secara umum arus yang melalui motor *BLDC* adalah arus bolak balik yang timbul dari perubahan polarisasi *gate driver*. Setiap perubahan polarisasi tersebut ditentukan berdasarkan posisi medan pada *winding BLDC*. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi perubahan motor seperti pada sistem kendaraan ditunjukkan oleh Gambar 2.2. Selain itu, terdapat pengendalian berupa *feedback* kecepatan yang akan menentukan *respon driver* untuk merubah pewaktuan dalam polarisasinya. Dengan mengetahui kecepatan tersebut, perbedaan nilai kecepatan motor dan *setpoint* yang diinginkan dapat disesuaikan dengan merubah parameter *driver* yang sedang berlangsung. Sehingga nilai kecepatan motor dapat mendekati *setpoint* yang diinginkan.

2.2.2. Control



Gambar 2.3 Diagram pengendali PID [15]

PID merupakan salah satu jenis metode pengendali untuk mendapatkan karakteristik kendali yang diinginkan. Secara umum, jenis kendali PID cocok digunakan pada kondisi satu *input* dan satu *output*. Selain itu, kendali PID dapat mengatasi gangguan sistem dan menstabilkan keluaran dengan kendali sederhana seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Dengan mengetahui besaran gangguan maka parameter kendali dapat menyesuaikan keluaran agar menjadi stabil[7]. Sistem pengendali ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu proporsional, Integral dan Derivatif. Menurut [14], persamaan P, I dan D disajikan dalam persamaan (2.1) sampai (2.3)

$$P(t) = K_p e(t) \quad (2.1) [15]$$

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.2) [15]$$

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3) [15]$$

Dengan K_p adalah konstanta proporsional. Parameter kontrol proporsional, merupakan nilai sebanding dengan *error* dari nilai masukan. Dengan menggunakan parameter ini maka nilai keluaran *controller* proporsional adalah hasil dari perkalian *error* masukan dengan nilai konstanta parameter proporsional[16]. Nilai parameter ini memiliki karakteristik konstanta proporsional berbanding lurus dengan kecepatan respons, jika konstanta melebihi nilai tertentu maka sistem akan tidak stabil, dan konstanta dapat mengurangi *error* namun tidak dapat menghilangkannya. Sistem pengendali ini direpresentasikan oleh persamaan (2.1).

Parameter kontrol integral, merupakan nilai yang mengatur sistem untuk menghilangkan eror pada kondisi tunak. Sifat dari kendali ini cenderung lambat untuk mencapai *set point* sehingga memerlukan parameter lain untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Sifat dari kontrol ini adalah hasil penjumlahan secara *kontinyu* nilai masukan yang berupa eror[16]. Dengan demikian jika tidak ada eror masukan maka keluaran kendali tidak akan berubah. Sistem kendali ini direpresentasikan pada persamaan (2.2).

Selain itu terdapat parameter kontrol derivatif, yaitu parameter operasi derivatif yang memiliki perubahan instan dalam jangka waktu yang pendek. Bentuk keluaran parameter ini menyerupai impuls maupun sinyal step[17]. Sifat dari kontrol ini hanya merespons perubahan eror pada sistem, sehingga jika tidak ada eror maka kontrol tidak berubah. Sedangkan pada stabilitas sistem, perubahan parameter akan meningkatkan stabilitas sebelum terjadinya *overshoot*. Persamaan untuk merepresentasikan parameter ini ditunjukkan pada persamaan (2.3).

$$PI(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.4) [15]$$

$$PD(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5) [15]$$

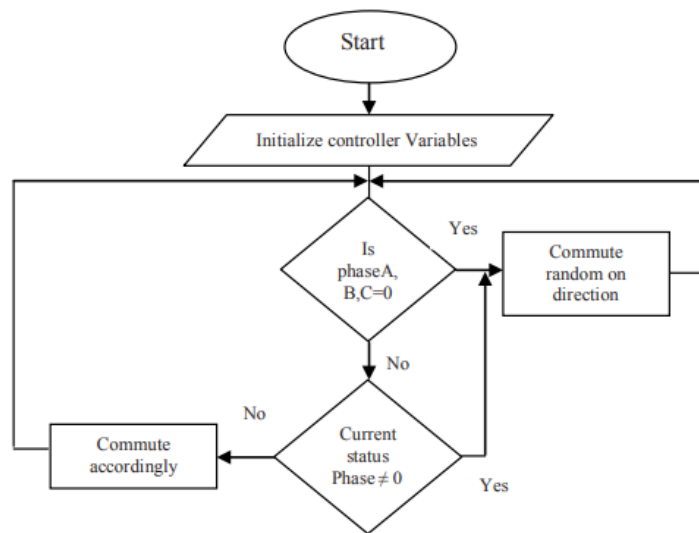
$$PID(t) = K_p e(t) + K_i \left(\int_0^t e(\tau) d\tau \right) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6) [15]$$

Gabungan parameter kontrol dapat digunakan untuk mendapatkan karakteristik kendali sesuai dari sifat parameternya. Terdapat 3 pengendali yang umum digunakan yaitu kendali PI (proporsional Integral), PD (proporsional Derivatif dan PID. Kontrol PI ditunjukkan pada persamaan (2.4) memiliki sifat yang sesuai pada sistem dengan respons cepat, akurat dan stabil. Sedangkan pada kontrol PD ditunjukkan pada persamaan (3.5) memiliki karakteristik dengan respons cepat namun tidak akurat. Selain itu terdapat gabungan dari ketiga parameter yaitu kendali

PID ditunjukkan pada persamaan (3.6) yang memiliki sifat dengan respons cepat, akurat dan galat yang kecil maupun tidak ada pada *steady state*.

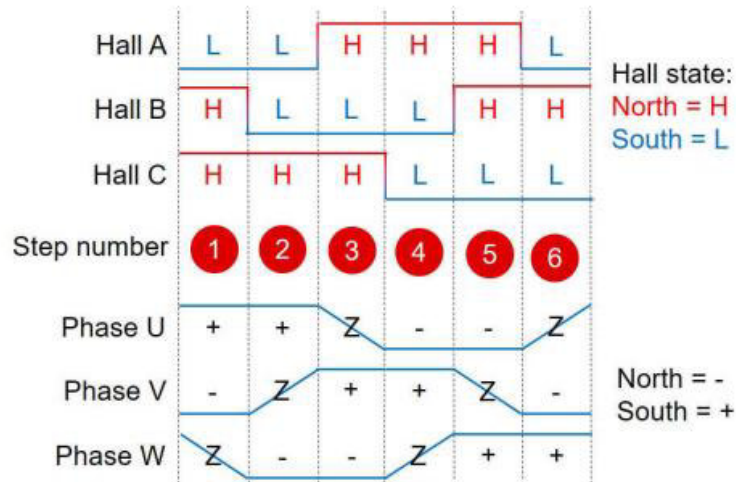
2.2.3. Positioning Control of BLDC

Dalam pengendalian kecepatan *BLDC*, dibutuhkan kontrol posisi masing-masing fase *winding* baik dengan sensor maupun *sensorless*. Penentuan posisi ini dilakukan karena gaya gerak yang timbul pada *BLDC* terjadi saat medan magnet timbul dari aliran arus pada *winding* yang sesuai. Dengan mengetahui posisi *BLDC* tersebut dapat diselaraskan pada kecepatan yang diinginkan saat dilakukan pengendalian.



Gambar 2.4 Sensorless model BLDC flowchart [18]

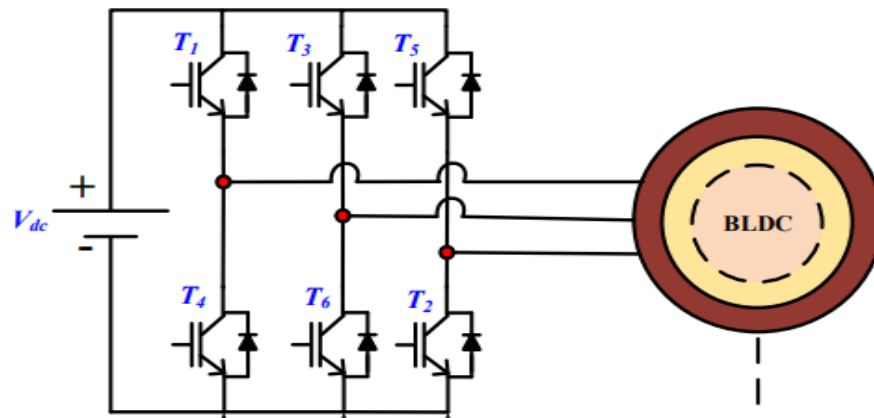
Metode *sensorless* menggunakan pembacaan nilai *back EMF* yang muncul akibat aliran arus pada lilitan *BLDC*. Dengan pembacaan ini sistem tidak memerlukan sensor yang harus dipasang pada *BLDC* namun hanya membaca nilai arus akibat perubahan *back emf* pada masing-masing fase *line*. Perubahan arus tersebut akan diubah menjadi nilai logika seperti Gambar 2.4 melalui rangkaian *encoder*. Konversi nilai pada *encoder* tersebut disusun oleh komponen diferensial melalui Op-Amp yang disesuaikan pada tegangan referensi yang dipakai sehingga menjadi nilai logika yang dapat dibaca oleh mikrokontroler dari sistem.



Gambar 2.5 Komutasi pada Hall Sensor [19]

Sedangkan metode dengan sensor, diperlukan sebuah sensor yang terpasang pada *BLDC* seperti *Hall Effect Sensor*. Sensor ini akan membaca perubahan medan magnet akibat pergerakan magnet sehingga menimbulkan *flux* magnet. Data yang dibaca sensor akan menjadi dasar logika untuk menentukan nilai fase *inverter* pada iterasi selanjutnya seperti Gambar 2.5. Namun, nilai dari tegangan keluaran *Hall* sensor harus disesuaikan terlebih dahulu agar sama dengan polarisasi nilai logika dari *mikrokontroller*.

2.2.4. Full Bridge Inverter



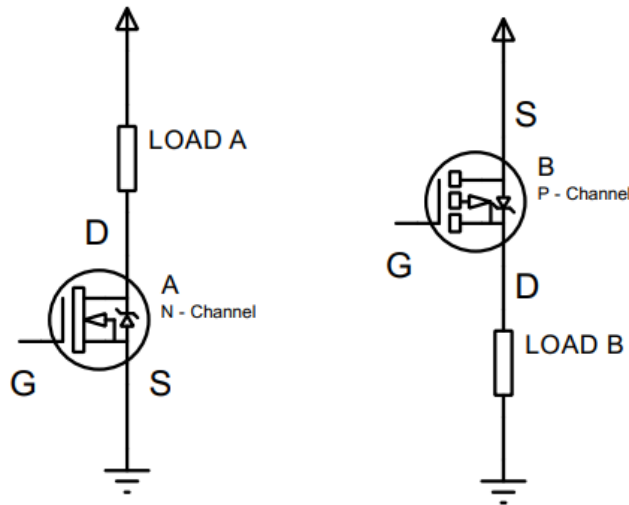
Gambar 2.6 Full Bridge Circuit [20]

Secara umum rangkaian *fullbridge* memiliki jumlah *driver* sebanyak 6 jika memiliki 3 *line* fase. Karakteristik dari rangkaian *fullbridge* adalah sinyal keluaran yang memiliki fase penuh. Masing-masing *line* yang dihasilkan dari sinyal keluaran tersusun oleh rangkaian *halfbridge*. Rangkaian *halfbridge* terdiri dari bagian *high side* dan *low side* seperti ditunjukkan oleh Gambar

2.6. Bagian *high side* merupakan jalur yang terhubung langsung oleh sumber tegangan. Sedangkan pada *low side* merupakan bagian yang terhubung langsung dengan sumber tegangan negative maupun *line common*. Jalur yang berada di antara *high side* dan *low side* merupakan beban sisten yang mendapat keluaran tegangan dari *driver*.

Rangkaian *full bridge* memiliki *output* arus bolak balik. Arus tersebut dihasilkan oleh sistem buka tutup *driver* pada setiap *line* yang terhubung. Ketika terdapat perubahan *transient* pada *driver fullbridge* maka akan timbul aliran arus sesuai polarisasi *driver* yang bekerja. Komutasi dari *driver* tersebut akan menimbulkan torsi dan putaran pada motor *BLDC*. Besaran torsi akan sebanding dengan nilai tegangan dan frekuensi akan sebanding dengan kecepatan rotasi *BLDC*.

Driver yang sering digunakan pada aplikasi *BLDC* adalah jenis FET (*field effect transistor*). Komponen jenis ini memiliki karakteristik yang cocok digunakan pada beban arus tinggi seperti *BLDC*. Salah satu jenis *FET* yang digunakan pada sistem DC adalah *Mosfet*(*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). *Mosfet* merupakan salah satu transistor dengan sifat semikonduktor yang digunakan sebagai *switch* pada bidang elektronika. Transistor jenis ini dibedakan menjadi tipe-N (*NMOS*) dan tipe-P (*PMOS*). Setiap transistor tersebut terbagi menjadi *Drain*, *Source* dan *Gate*. Sedangkan berdasarkan mode kerjanya *mosfet* terbagi menjadi 2, yaitu mode *depeletion* (pengosongan) dan mode *enhancement* (peningkatan). Perbedaan dari kedua tipe tersebut terletak pada bentuk fisik dari komponen, pada mode *depletion drain* dan *source* terhubung sedangkan pada mode *enhancement drain* dan *source* tidak terhubung.



Gambar 2.7 Tipe N (kiri) dan Tipe P (kanan)

Tipe *mosfet* pada Gambar 2.7 memiliki perbedaan polarisasi saat tegangan *Drain* dan *Source* terhubung. Pada tipe *N-Channel*, *Gate* harus memiliki nilai tegangan yang mencapai *threshold* antara *Gate* dan *Source* sehingga tegangan keduanya bernilai nol dan *mosfet* akan berada pada posisi ON. Sedangkan untuk tipe *P-Channel*, nilai tegangan pada *Gate* dan *source* adalah pada polarisasi *negatif* sebesar minus *source* sehingga *mosfet* akan berada pada posisi ON. Selain itu, kedua *mosfet* ini memiliki perbedaan hambatan dalam pada saat kondisi ON. Tipe *N-channel* memiliki resistansi lebih rendah yaitu di bawah satu ohm sedangkan tipe *P-Channel* memiliki resistansi lebih tinggi yaitu di atas satu ohm.

2.2.5. Perhitungan TKDN

TKDN (tingkat komponen dalam negeri) merupakan persentase dari nilai produk dalam negeri jika dihasilkan oleh Perusahaan yang berinvestasi dan memproduksi di Indonesia yang dalam proses produksi dimungkinkan penggunaan bahan baku impor. Nilai TKDN produk ini dapat dihitung dari nilai barang dan jasa maupun gabungan barang dan jasa. Untuk mendapatkan persentase TKDN barang dapat digunakan perhitungan seperti berikut.

$$TKDN = \frac{\text{komponen dalam negeri}}{\text{nilai barang atau jasa}} \times 100\% \quad (4.1)$$

2.3. Standar Keteknikan

SNI (Standar Nasional Indonesia) adalah lembaga di Indonesia yang bertanggung jawab atas pengembangan standar nasional di berbagai sektor industri, perdagangan, dan layanan.

Fungsinya melibatkan penetapan standar untuk memastikan bahwa produk dan layanan yang dihasilkan atau disediakan di Indonesia memenuhi persyaratan tertentu dalam hal kualitas, keamanan, dan kepatuhan lingkungan. Implementasi SNI umumnya melibatkan berbagai sektor, termasuk manufaktur, otomotif, makanan, dan lain-lain, dengan tujuan untuk memastikan bahwa produk-produk tersebut memenuhi standar tertentu yang telah ditetapkan.

Sementara itu, IEC (*International Electrotechnical Commission*) adalah organisasi internasional yang mengembangkan standar teknis untuk produk, sistem, dan layanan di bidang teknologi listrik dan elektronika. Fokus IEC adalah memfasilitasi perdagangan internasional dengan menyediakan standar yang seragam di seluruh dunia. Standar IEC mencakup berbagai aspek seperti keamanan, interoperabilitas, dan efisiensi dalam teknologi listrik dan elektronika. Produsen, insinyur, dan perusahaan di seluruh dunia menggunakan standar IEC untuk memastikan bahwa produk dan sistem yang mereka kembangkan memenuhi persyaratan internasional yang telah ditetapkan oleh IEC. Dengan demikian, SNI dan IEC masing-masing berperan penting dalam memastikan kualitas, keamanan, dan interoperabilitas produk dan layanan, baik di tingkat nasional maupun internasional.

Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) di Indonesia berfungsi sebagai pedoman teknis yang mengatur prosedur pemasangan instalasi listrik dengan tujuan utama untuk memastikan keselamatan, keandalan, dan efisiensi dalam penggunaan sistem listrik. Dalam penyusunannya, PUIL secara erat terkait dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *International Electrotechnical Commission* (IEC). Referensi ke SNI tercermin dalam pemilihan peralatan listrik, tipe kabel, perlindungan terhadap kebakaran, dan parameter lainnya yang mencerminkan persyaratan nasional yang telah ditetapkan oleh SNI. Di sisi lain, keterkaitan dengan IEC tercermin dalam aspek-aspek instalasi listrik yang mencerminkan prinsip-prinsip dan standar internasional yang diakui. Dengan merujuk pada standar SNI dan IEC, PUIL menciptakan kerangka kerja yang komprehensif untuk instalasi listrik, menggabungkan persyaratan nasional dan internasional agar sesuai dengan standar keselamatan dan inovasi terkini. Hal ini membantu membangun lingkungan listrik yang tidak hanya memenuhi standar nasional, tetapi juga mengakomodasi prinsip-prinsip internasional dalam teknologi listrik dan elektronika.

Tabel 2.2 Daftar standar teknik yang dipakai

PUIL 2020 – Bagian 7-22 – Persyaratan untuk instalasi atau lokasi khusus – Suplai untuk kendaraan listrik	722.3.2 Titik hubung	Titik terminasi pada instalasi magun di mana energi ditransfer ke/dari satu kendaraan listrik
	722.3.3 Faktor Kebutuhan	Rasio yang dinyatakan sebagai nilai atau persentase, dari kebutuhan maksimum sirkit atau satu kelompok sirkit pada periode tertentu terhadap beban terpasang total terkait dari sirkit tersebut.
	722.443.4 kendali voltase lebih	Titik hubung yang dapat diakses oleh publik dianggap sebagai bagian dari layanan publik dan karena itu harus diproteksi terhadap voltase lebih transien.

Standar Teknik pada Tabel 2.2 digunakan untuk memberikan acuan desain teknik pada judul proposal ini. Acuan tersebut berupa proteksi dan standar penggunaan koneksi antar konduktor[21]. Proteksi pada kendaraan Listrik khususnya pada bagian *controller* harus memiliki standar keamanan untuk menjaga efek *thermal* melalui *thermalpad* dan voltase berlebih melalui *fuse* konduktor. Bahaya *thermal* dapat menyebabkan kerusakan fisik pada *controller*. Efek ini dihasilkan oleh komponen saklar elektrik seperti *mosfet* dan konversi tegangan karena disipasi energi beban. Sedangkan untuk standar keamanan konektor maupun konduktor adalah ukuran konduktor minimum dan tetapan yang disepakati agar dapat digunakan oleh publik.

2.4. Analisis Stakeholder

Stakeholder yang terdapat pada judul ini adalah *User* dan *Distributor*. Pengguna/*user* merupakan *stakeholder* terbesar dikarenakan alat yang dirancang akan dibuat berdasarkan hasil *survey* yang telah dilakukan. *Distributor* memiliki peran untuk memberikan data mengenai spesifikasi *controller* serupa yang cenderung diminati oleh pengguna. Alat yang dirancang akan digunakan untuk kendaraan listrik berdaya rendah seperti sepeda atau *scooter*. *Minicont* yang dibuat juga akan lebih berfokus kepada TKDN untuk membantu perkembangan industri kendaraan listrik di Indonesia.

2.5. Analisis Aspek yang Mempengaruhi Sistem

Ada berbagai aspek yang mempengaruhi proses perancangan Mini *controller* untuk EV (*electric vehicle*) berdaya rendah, beberapa pengaruh tersebut berasal dari pertumbuhan ekonomi dunia dan kesadaran masyarakat untuk melakukan transisi energi. Perkembangan teknologi di dunia mengakibatkan pergantian ke era globalisasi yang berfokuskan kepada Energi terbarukan. Hal ini menjadi suatu dorongan bagi negara di dunia untuk transisi dari kendaraan konvensional

ke kendaraan listrik. Mini *controller* ini akan dirancang sedemikian rupa agar dapat membantu negara Indonesia masuk ke dalam perkembangan teknologi dunia sekaligus memastikan kendaraan tersebut dapat diciptakan dalam negeri dengan faktor ekonomi yang lebih terjangkau dan membantu menjaga lingkungan yang ada di Indonesia.

2.6. Spesifikasi Sistem

- Digunakan pada beban motor 500 watt
- Menggunakan *mikrocontroller* atmega328P-DIP
- *Rating input* maksimum adalah 200 V, 100 A untuk *controller*
- Tegangan baterai 48 V dan 12 Ampere
- Tipe pengendali PID dengan *feedback* kecepatan dari *hall* sensor
- Memiliki kecepatan maksimum 800 RPM
- Ukuran *PCB controller* 180 x 50 mm

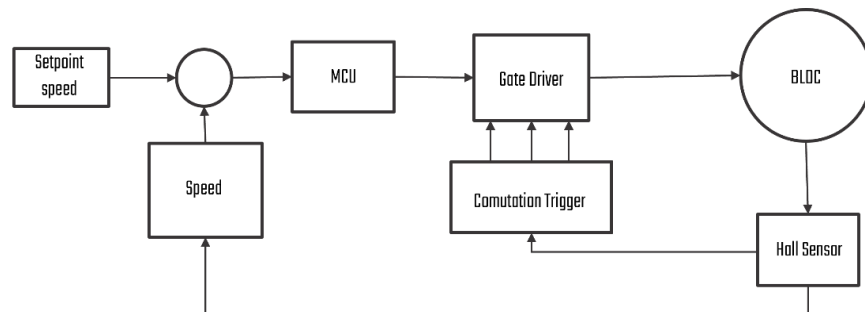
BAB 3 USULAN SOLUSI

Berbagai kemungkinan solusi yang dapat diterapkan akan dieksplorasi secara detail untuk dibandingkan sebelum terpilih solusi terbaik berdasarkan kondisi saat ini. Masing-masing solusi yang diberikan memiliki tujuan yang sama untuk mendapatkan desain perangkat keras dan pengendalian yang dapat mencapai nilai TKDN yang sesuai dengan batas minimal. Usulan solusi yang pertama menggunakan sistem kendali *closed loop* melalui *feedback sensor hall effect*. Sedangkan pada usulan kedua digunakan juga sistem kendali *closed loop*, namun menggunakan metode *FOC (field oriented control)*. Kedua solusi tersebut memiliki perbedaan pada penggunaan *feedback* yang akan digunakan sebagai referensi pada sistem kendali. Selain itu, dalam segi performa, kedua solusi ini memiliki karakteristik yang berbeda. Usulan solusi pertama unggul pada kondisi RPM (*rotation per minute*) rendah dan beban tinggi. Sedangkan pada usulan kedua unggul pada beban rendah dan RPM tinggi.

3.1. Usulan pertama: *BLDC Mini Controller* dengan Hall Sensor

Usulan desain 1 diperuntukkan untuk *BLDC* dengan *hall* sensor. *Hall* sensor pada *BLDC*, digunakan untuk mengetahui posisi fase dan sebagai *feedback* kecepatannya. Metode dengan *hall* sensor ini dipilih karena memiliki spesifikasi untuk beradaptasi pada kecepatan tinggi, memiliki respons cepat dengan waktu yang pendek, tahan dari kondisi *stall* dan memiliki pembacaan presisi tinggi khususnya pada beban kerja yang berfluktuasi. Parameter yang digunakan untuk menentukan performa sistem ini adalah ketepatan pembacaan posisi *BLDC* dan *output* kecepatan yang diinginkan saat pengendalian.

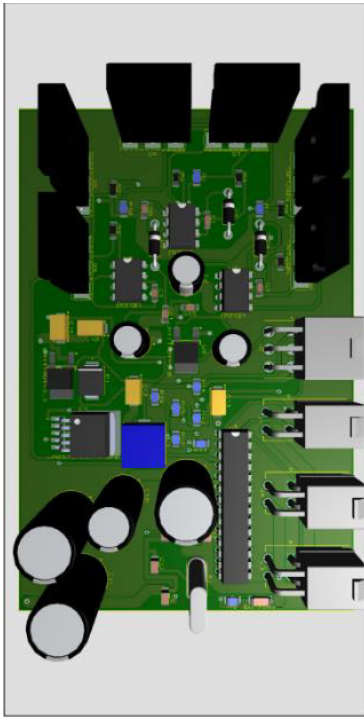
3.1.1. Desain *BLDC Mini Controller* Dengan Hall Sensor



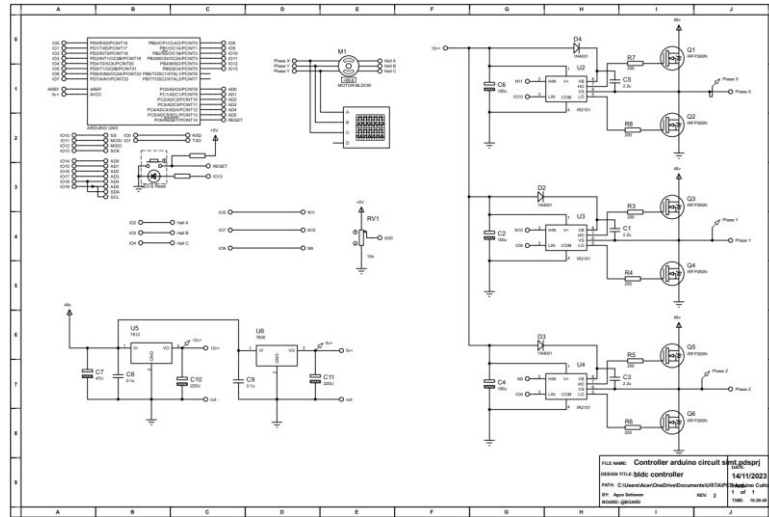
Gambar 3.1 Block diagram sistem kendali solusi pertama

Pada sistem ini akan bekerja dengan memanfaatkan nilai sensor sebagai referensi *feedback* untuk komutasinya. Nilai yang dibaca pada sensor akan dikonversi menjadi nilai kecepatan *BLDC*

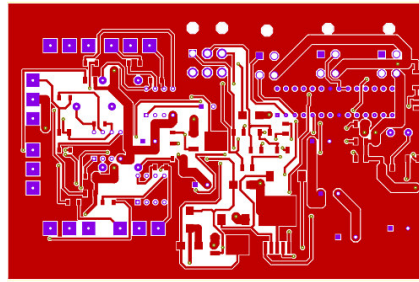
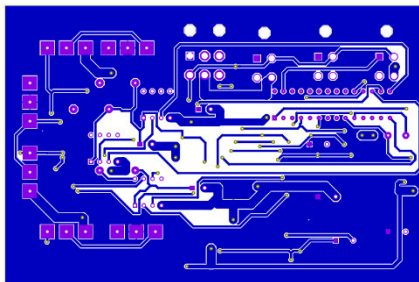
saat ini. Nilai tersebut akan digunakan sebagai acuan keadaan perputaran BLDC. Jika perputaran BLDC melebihi setpoint maupun komutasi yang terjadi tidak sesuai dengan sensor maka sistem akan memberikan kondisi STALL dan menghentikan perputaran BLDC.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.2 Ilustrasi usulan rancangan sistem secara umum. (a) Desain Fisik dalam 3D (b) Rangkaian circuit utama, (c) PCB board

Gambar 3.2 terbagi menjadi 3 bagian yang dapat membantu memvisualisasikan rancangan perangkat keras yang ingin di kerjakan. Pada bagian (a) merupakan Desain Fisik dalam 3D untuk rincian ukurannya adalah 150 mm x 80 mm. Kemudian pada bagian (b) merupakan Desain Sirkuit yang telah disusun untuk menunjukkan diagram listrik utama pada *controller*. Sedangkan pada

bagian (c) merupakan tampilan *PCB* yang dipisahkan menjadi layer 1 (bagian *plane power*) dan layer 2 (bagian *plane signal*). Kebutuhan komponen utama dalam perancangan mini *controller* ini disajikan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Inventarisasi kebutuhan usulan sistem perangkat keras Minicont EV

No	Nama Alat	Keterangan
1	Atmega328p	Mikrokontroler untuk MCU pada <i>controller</i>
2	IR2101S	<i>Gate Driver</i> untuk <i>driving mosfet</i> dengan tegangan lebih tinggi dari <i>mcu</i>
3	IRFP260N	<i>Mosfet</i> untuk mengendalikan <i>phase</i> beban <i>BLDC</i>
4	<i>BLDC</i> 500 W	<i>BLDC</i> yang dikendalikan oleh <i>controller</i> sebagai beban
5	Baterai Pack 48 V 12 Ah	Supply tegangan baterai untuk menghidupkan <i>controller</i> dan beban

3.1.2. Rencana Anggaran Desain Sistem 1

Rencana anggaran untuk usulan solusi pertama disajikan dalam Tabel 3.2. Komponen termahal dalam usulan ini terletak pada harga motor *BLDC* dan komponen baterainya. Sedangkan rencana anggaran untuk keperluan mini kontrolernya relatif jauh lebih murah dibandingkan dengan kedua komponen tersebut.

Tabel 3.2 Rencana anggaran pengembangan sistem minicont EV

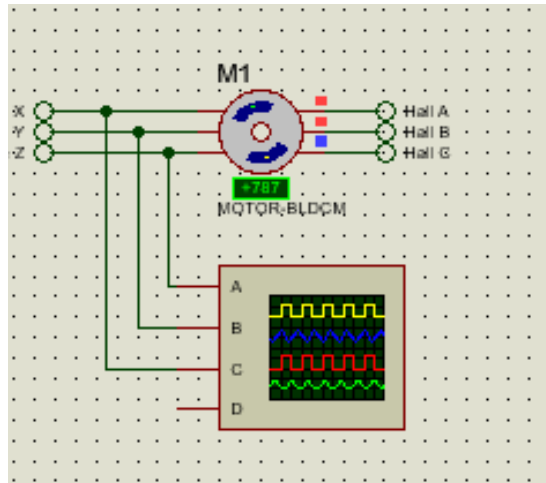
No.	Ketogori	Reference	Satuan	Stock Code	Harga satuan	Jumlah	Harga Total
1.	<i>BLDC</i>	M1	500 w	-	2.000.000	1	2.000.000
2.	Capacitors	C1,C3,C5	2.2uf	Digikey 478-1644-1-ND	5.000	3	15.000
3.	Capacitors	C2,C4,C6	100uf	Digikey P15156-ND	4.000	3	12.000
4.	Capacitors	C7	47uF	Digikey P5312-ND	4.000	1	4.000
5.	Capacitors	C8-C9	0.1uF	Digikey 311-1179-1-ND	6.000	2	12.000
6.	Capacitors	C10-C11	220uF	Digikey P5153-ND	2.000	2	4.000

No.	Ketogori	Reference	Satuan	Stock Code	Harga satuan	Jumlah	Harga Total
7.	Resistors	R1	10k	Digikey P10KZTR-ND	900	1	900
8.	Resistors	R2	1k	Digikey P10KZTR-ND	150	1	150
9.	Resistors	R3-R8	200	Digikey P10KZTR-ND	650	6	3.900
10.	IC Micro	U1	Atmega328p	-	50.000	1	50.000
11.	<i>Gate Driver</i>	U2-U4	IR2101S	-	16.000	3	48.000
12.	IC Regulator	U5	IC 7812	-	3.000	1	3.000
13.	IC Regulator	U6	IC 7805	-	2.000	1	2.000
14.	<i>Mosfet</i>	Q1-Q6	IRFP260N	-	16.000	6	96.000
15.	Diodes	D1	LED-YELLOW	-	2.000	1	2.000
16.	Diodes	D2-D4	1N4001	-	1.500	3	4.500
17.	Baterai Pack	-	48v 12 Ah	-	1.200.000	1	1.200.000
						Total	3.457.450

3.1.3. Analisis Risiko Desain 1

Desain pada usulan 1 hanya dapat bekerja jika *BLDC* yang dikendalikan memiliki sensor posisi seperti *hall effect*. *BLDC* yang memiliki sensor secara umum lebih mahal dengan *BLDC* yang tidak memiliki sensor. Selain itu, sensor posisi memiliki puncak RPM lebih rendah daripada metode tanpa sensor. Namun, sensor *Hall effect* unggul pada penggunaan beban pada RPM rendah seperti kendaraan listrik.

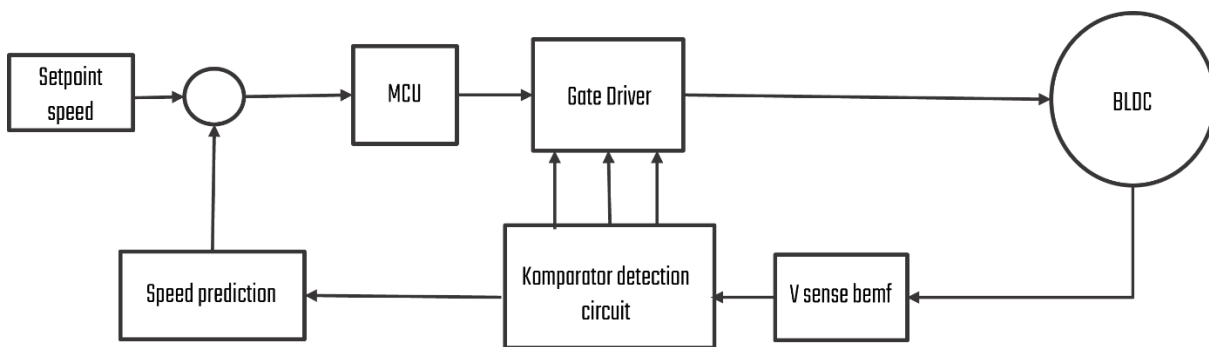
3.1.4. Pengukuran Performa Desain 1



Gambar 3.3 Tampilan beban BLDC pada simulasi

Pengukuran performa usulan solusi I dilakukan dengan mengukur kecepatan (RPM), daya yang digunakan dan karakteristik sistem lainnya. Pada simulasi *proteus*, sistem memiliki parameter kecepatan 787 RPM, kecepatan ini terjadi pada kondisi tanpa beban dan saat mikrokontroler memiliki kecepatan *clock* 1 MHz. Sedangkan pada karakteristik sistem, perubahan *input* secara dinamis dapat diterima dengan baik. Gambar 3.3 merupakan hasil simulasi usulan solusi pertama dengan menggunakan *software proteus*.

3.1.5. Usulan kedua: BLDC mini Controller dengan metode Sensorless

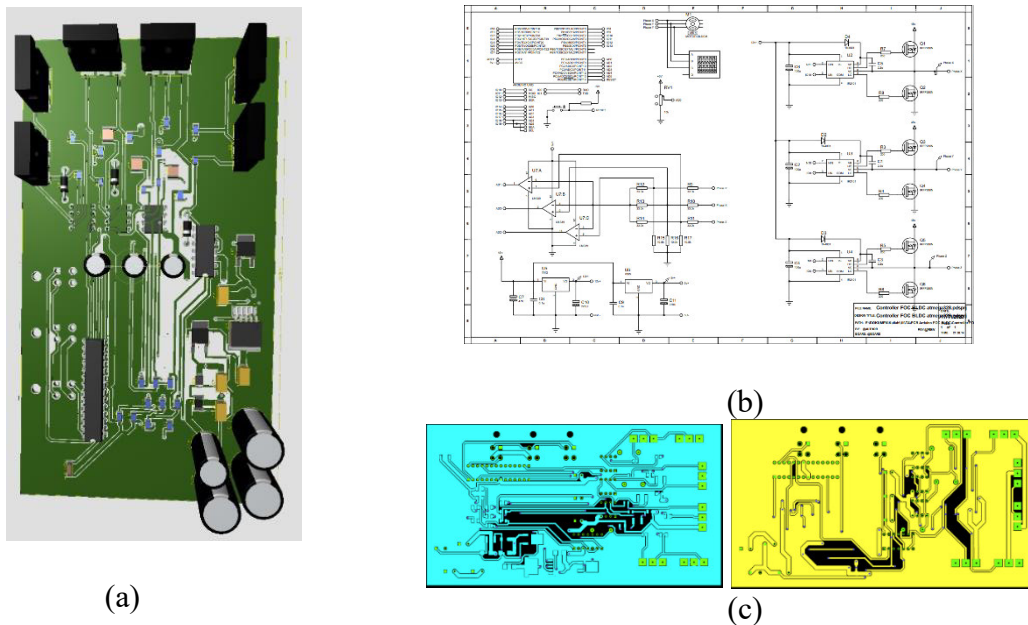


Gambar 3.4 Sistem Blok diagram pengendalian metode sensorless

Usulan kedua ini digunakan pada *BLDC* tanpa memerlukan sensor yang tertanam di dalamnya. Hampir semua jenis *BLDC* tiga *phase* dapat digunakan dengan metode *sensorless* ini. Metode *sensorless* digunakan untuk membaca posisi fase *winding* pada *BLDC* dan juga membaca kecepatannya dengan perubahan *back emf* seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Desain ini menggunakan deteksi posisi *BLDC* yang lebih kompleks karena perlu mengukur nilai *back emf*

pada masing-masing fase. Nilai *back emf* yang terbaca akan dideteksi melalui rangkaian komparator. Perubahan nilai *back emf* yang melalui *zero cross* akan memicu komparator dan dibaca sebagai sinyal oleh mikrokontroler. Komutasi yang timbul dari deteksi *zero cross* ini akan digunakan untuk menentukan urutan komutasi pada iterasi selanjutnya.

3.2. Desain Sistem 2



Gambar 3.5 Visualisasi rangkaian sistem dan tampilan 3D PCB usulan kedua

Gambar 3.5 terbagi menjadi 3 bagian yang dapat membantu memvisualisasikan rancangan perangkat keras yang ingin di kerjakan. Pada bagian (a) merupakan Desain Fisik dalam 3D untuk rincian ukuran nya adalah 180 mm x 100 mm. Kemudian pada bagian (b) merupakan Desain Sirkuit yang telah disusun untuk menunjukkan diagram elektris utama pada *controller*. Sedangkan pada bagian (c) merupakan tampilan *PCB* yang dipisahkan menjadi layer 1 (bagian *plane power*) dan layer 2 (bagian *plane signal*).

3.2.1. Rencana Anggaran Desain 2

Rencana anggaran untuk usulan kedua disajikan secara lengkap dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Rencana Anggaran untjuk Desain 2

No.	Ketogori	Reference	Satuan	Stock Code	Harga satuan	Jumla h	Harga Total
1.	<i>BLDC</i>	M1	500 w	-	2.000.000	1	2.000.000

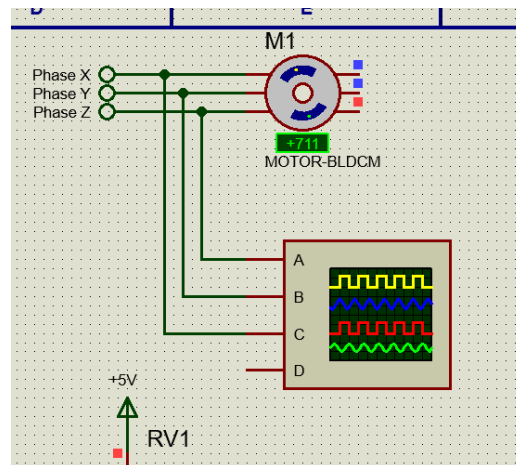
No.	Ketogori	Reference	Satuan	Stock Code	Harga satuan	Jumlah	Harga Total
2.	Capacitors	C1,C3,C5	2.2uf	Digikey 478-1644-1-ND	5.000	3	15.000
3.	Capacitors	C2,C4,C6	100uf	Digikey P15156-ND	4.000	3	12.000
4.	Capacitors	C7	47uF	Digikey P5312-ND	4.000	1	4.000
5.	Capacitors	C8-C9	0.1uF	Digikey 311-1179-1-ND	6.000	2	12.000
6.	Capacitors	C10-C11	220uF	Digikey P5153-ND	2.000	2	4.000
7.	Resistors	R1	10k	Digikey P10KZTR-ND	900	1	900
8.	Resistors	R2	1k	Digikey P10KZTR-ND	150	1	150
9.	Resistors	R3-R8	200	Digikey P10KZTR-ND	650	6	3.900
10.	Resistor		33k		650	6	3.900
11.	Resistor		10k		650	3	1.350
12.	IC Micro	U1	Atmega328p	-	50.000	1	50.000
13.	Gate Driver	U2-U4	IR2101S	-	16.000	3	48.000
14.	IC Regulator	U5	IC 7812	-	3.000	1	3.000
15.	IC Regulator	U6	IC 7805	-	2.000	1	2.000
16.	Komparator	U7	IC 339	-	10.000	1	10.000
17.	Mosfet	Q1-Q6	IRFP260N	-	16.000	6	96.000
18.	Diodes	D1	LED-YELLOW	-	2.000	1	2.000

No.	Ketogori	Reference	Satuan	Stock Code	Harga satuan	Jumlah	Harga Total
19.	Diodes	D2-D4	1N4001	-	1.500	3	4.500
20.	Baterai Pack	-	48v 12 Ah	-	1.200.000	1	1.200.000
						Total	3.472.700

3.2.2. Analisis Risiko Desain 2

Sistem kendali menggunakan deteksi *back emf* memiliki jumlah komponen utama yang lebih banyak dari desain 1. Hal ini dikarenakan desain 2 memerlukan komponen komparator untuk mendeteksi perubahan *back emf*. Jumlah komponen yang lebih banyak menyebabkan ukuran *board PCB* menjadi lebih besar. Selain itu, untuk menentukan perubahan *back emf* memerlukan nilai yang berbeda pada masing-masing *BLDC* jika terdapat perbedaan daya yang signifikan. Sedangkan dalam nilai ekonomi, harga total untuk merangkai *PCB* desain 2 sedikit lebih mahal karena perlu menggunakan komponen lebih banyak dan ukuran board yang lebih besar.

3.2.3. Pengukuran Performa Desain 2



Gambar 3.6 Simulasi pada rangkaian sensorless

Gambar 3.6 Performa yang diukur adalah kecepatan *rpm* keluaran dan karakteristik sistem. Pengujian ini dilakukan melalui simulasi *proteus* dengan replika rangkaian elektronis untuk mendapatkan gambaran hasil pengendalian *BLDC*. Rangkaian yang disimulasi memiliki perbedaan dengan Desain 1 yaitu tidak adanya sensor dan sebagai gantinya referensi posisi didapat melalui prediksi posisi dengan pembacaan *bemf*. Pembacaan *bemf* akan di komparasi dengan

komponen komparator untuk menghasilkan kombinasi sinyal digital yang berisi posisi *BLDC*. Hasil keluaran menunjukkan maksimum kecepatan adalah 710 *rpm* dengan adaptasi perubahan *input* yang baik.

3.3. Analisis dan Penentuan Usulan Solusi/Desain Terbaik

Tabel 3.4 Perbandingan dan Analisis Solusi terbaik

Jenis Perbandingan	Desain 1 (<i>sensored</i>)	Desain 2 (<i>sensorless</i>)
Kemudahan Pengendalian	Lebih mudah karena dapat menghasilkan nilai kecepatan langsung dari <i>output</i> sensor	Lebih sulit karena harus melakukan prediksi kecepatan terhadap nilai <i>bemf</i> yang timbul pada fase.
Aspek Biaya	Memiliki selisih Yang sangat sedikit dengan desain 2	Memiliki selisih Yang sangat sedikit dengan desain 1
Kemudahan Desain	Jumlah komponen lebih sedikit sehingga <i>PCB</i> lebih kecil	Jumlah komponen lebih banyak sehingga <i>PCB</i> menjadi lebih besar
Kemudahan Penggunaan	Hanya bisa digunakan pada <i>BLDC</i> dengan sensor	Dapat digunakan pada hampir semua <i>BLDC</i>
Kecepatan Maksimum	787 <i>rpm</i>	710 <i>rpm</i>

Berdasarkan Tabel 3.4, maka usulan yang terbaik pada analisis tersebut adalah solusi Desain I, usulan ini memiliki keunggulan desain elektris yang lebih minimum sehingga menghemat ukuran *board*. Selain itu, penyesuaian komutasi lebih mudah karena sinyal digital sudah mencerminkan posisi *BLDC* tanpa memerlukan perhitungan rasio tegangan sinyal *bemf* seperti Desain II. Sedangkan pada desain 2 fleksibilitas desain lebih tinggi karena dapat dipakai di semua *BLDC*. Sehingga desain 1 lebih unggul karena memiliki 3 poin keunggulan sedangkan desain 2 hanya memiliki 1 poin keunggulan.

3.4. Gantt Chart

Tabel 3.5 Gantt chart pelaksanaan Capstone Project sistem Minicont-EV

No.	Kegiatan/Capaian	Bulan ke -									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Survei dan identifikasi permasalahan	A									

No.	Kegiatan/Capaian	Bulan ke -									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Mencari literatur dan informasi untuk kebutuhan dan spesifikasi sistem	S									
3	Mengumpulkan seluruh ide solusi dan finalisasi usulan perancangan sistem		S	S	S						
	manajemen dan rancangan belanja			A	A						
4	Pengumpulan proposal Tugas Akhir 1/ <i>Capstone Project</i> dan seminar				A,S						
5	Pembelian alat dan bahan					A,S	A,S				
6	Perancangan sistem sesuai proposal						A,S	A,S	A,S		
7	Testing dan Validasi								A,S	A,S	
8	<i>Expo</i> dan pengumpulan laporan akhir										A,S

Ket. : PIC – *Person in Charge* (Pihak yang bertanggung untuk kegiatan tersebut) A : Alvin, S : (Agus) Setiawan

3.5. Realisasi Pelaksanaan Tugas Akhir 1

Tabel 3.6 Realisasi aktivitas pelaksanaan tugas akhir 1

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
1.	Senin, 8 September 2023, 3 jam	Pengenalan kuliah perdana <i>capstone design</i>	Agus, Alvin

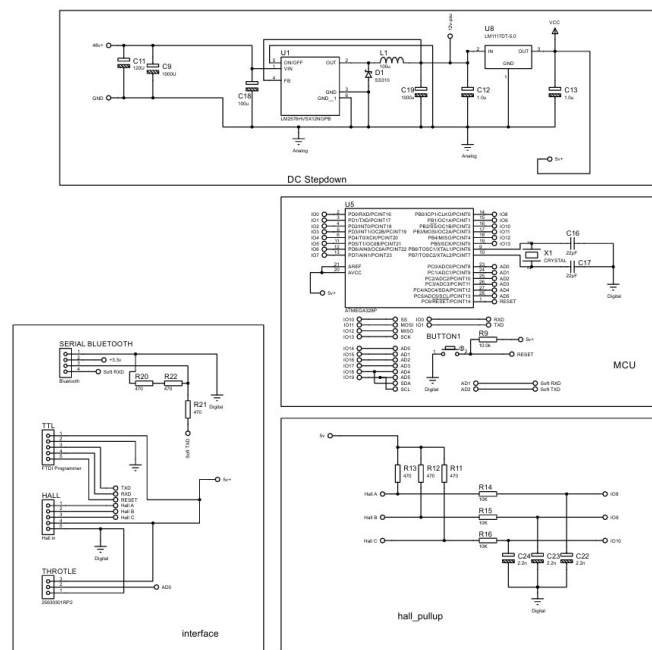
2.	Jumat, 15 September 2023, 2 jam	Perancangan kegiatan satu semester	Agus, Alvin
3.	Sabtu, 16 September 2023, 2 jam	Survei jurnal dan buku terkait pengendalian <i>BLDC</i>	Agus, Alvin
4.	Senin, 25 September 2023, 1 jam	Survei dengan <i>stakeholder</i>	Agus, Alvin
5.	Selasa, 26 September 2023, 2 jam	Studi Literatur	Agus, Alvin
6.	Selasa, 3 Oktober 2023, 2 jam	Perumusan latar belakang dan batasan masalah	Agus, Alvin
7.	Jumat, 11 Oktober 2023, 2 jam	Perumusan hasil studi literatur pada solusi sejenis	Agus, Alvin
8.	Senin, 16 Oktober 2023, 3 jam	Perumusan landasan teori dan usulan solusi	Agus, Alvin
9.	Selasa 7 November 2023, 4 jam	Perumusan alternatif solusi	Agus, Alvin
10.	Jumat, 10 November 2023, 5 jam	Perancangan elektris dan visual solusi	Agus, Alvin
11.	Senin 13 November 2023, 3 jam	Simulasi desain elektris	Agus, Alvin
12.	Rabu, 15 November 2023, 2 jam	Perumusan RAB projek	Agus, Alvin
13.	Senin 20 November 2023, 1 jam	Perumusan rencana kegiatan	Agus, Alvin

BAB 4 HASIL RANCANGAN DAN METODE PENGUKURAN

4.1. Hasil Rancangan Sistem

4.1.1. Rangkaian Elektronik

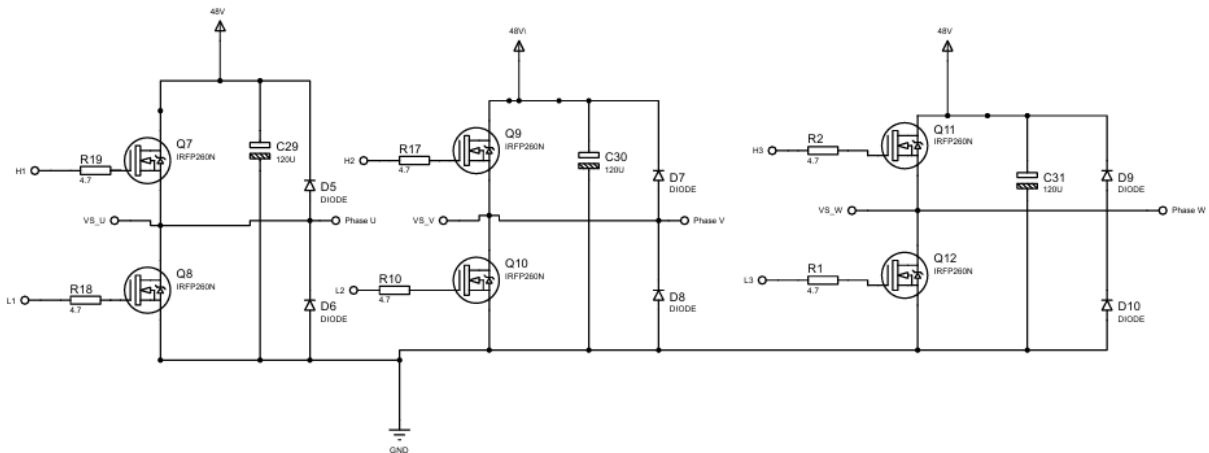
Rangkaian dasar untuk membentuk sistem Minicont-EV ini terdiri dari MCU (*main control unit*) sebagai pengatur logika pengendali, *gate driver* sebagai sistem yang menjembatani pengendali ke rangkaian beban, dan rangkaian 3 fasa yang berupa susunan 3 *phase bridge* menggunakan power NMOS FET. Gambar 4.1 merupakan rangkaian MCU sebagai pusat pengendali sinyal pulsa yang akan dikirim ke rangkaian 3 fasa. Mikrokontroler yang digunakan adalah jenis AVR dengan seri Atmega328p dan paket fisik berupa DIP-28. Mikrokontroler ini memiliki 6 buah pin PWM yang dapat digunakan, jumlah ini sudah sesuai dengan kebutuhan *gate driver* yang juga membutuhkan 6 pin. Sedangkan pada Gambar 4.1 adalah rangkaian *gate driver*. *Gate driver* ini digunakan untuk menjembatani sinyal mikrokontroler dengan tegangan kerja *mosfet* dan mengatur *floating ground* pada fasa nya. IC yang digunakan adalah IR2104 yang memiliki kemampuan melakukan *switching* dua NMOS FET dalam struktur *half bridge* dan memiliki proteksi untuk menghalangi *cross conduction* ketika dua *mosfet* menyala bersamaan.



Gambar 4.1 Rangkaian MCU dan pengendali

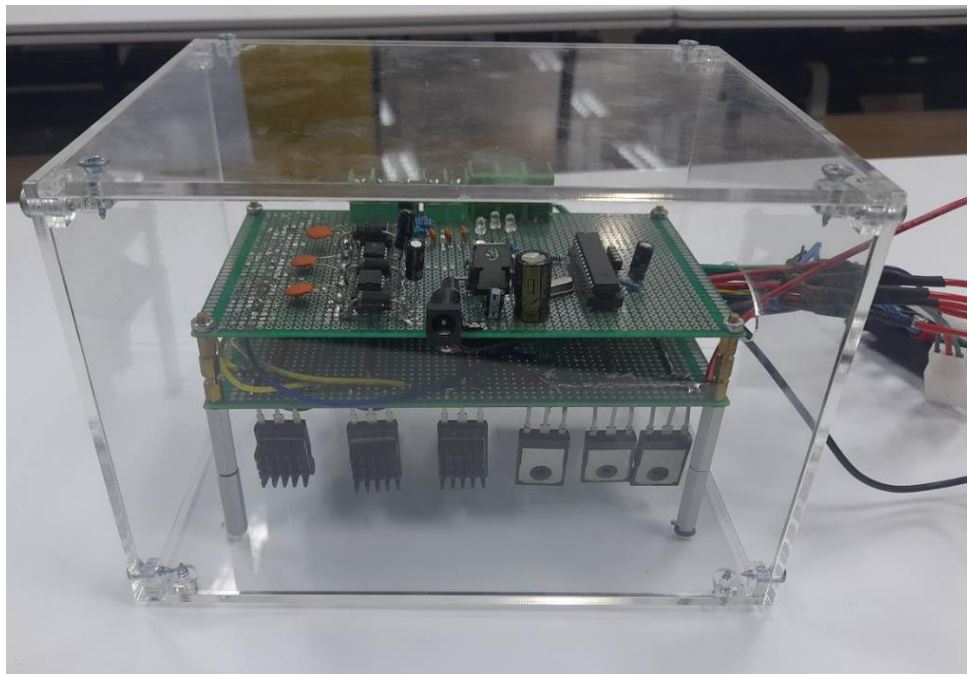
Gambar 4.2 adalah rangkaian *switching* 3 fasa untuk memutar beban *BLDC*. Rangkaian ini terdiri dari 6 buah NMOS FET yang akan melakukan *switching* berdasarkan sinyal yang dikirim

oleh MCE ke *gate driver*. Selain *mosfet*, rangkaian 3 fasa ini memiliki *Bulk* kapasitor dan dioda *Freewheeling*. *Bulk* kapasitor digunakan untuk mengurangi susut tegangan jika beban menyerap arus mendekati nilai maksimum pada saat *starting*. Sedangkan dioda *Freewheeling* digunakan untuk mengurangi gelombang osilasi tegangan yang muncul karena sifat beban induktif yang mempertahankan nilai level arusnya.

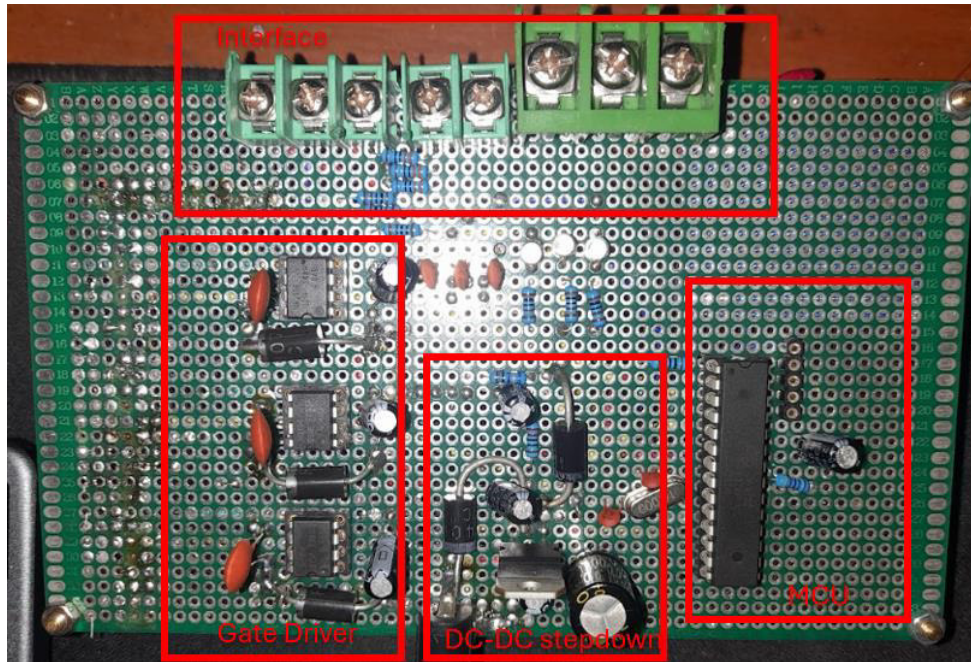


Gambar 4.2 Rangkaian 3 phase full bridge

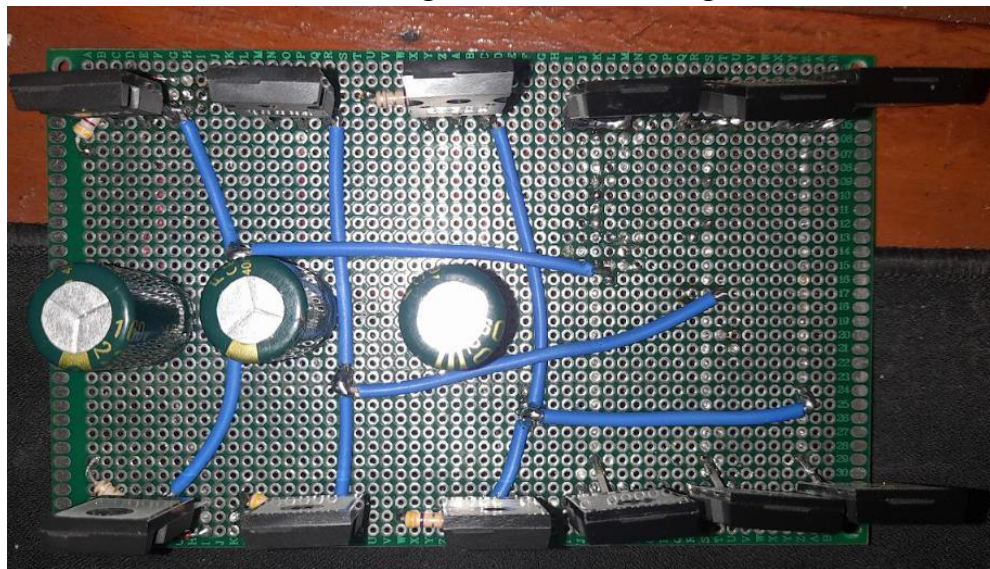
4.1.2. Hardware Hasil Perancangan



Gambar 4.3 Hardware Minicont-EV dengan casing



Gambar 4.4 Rangkaian MCU dan Pengendali



Gambar 4.5 Rangkaian Fullbridge 3 phase

Hardware dari Minicont-EV memiliki susunan dua papan PCB seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Rangkaian untuk pengendali dan pemrosesan data terletak pada papan PCB atas pada Gambar 4.4 dan rangkaian untuk beban 3 fase terletak pada bagian PCB bawah ditunjukkan oleh Gambar 4.5. Peletakan ini dilakukan karena satu papan PCB tidak mencukupi untuk semua komponen yang dipasang karena setiap komponen memiliki paket cetak *ThroughHole* atau membutuhkan lubang untuk dipasang. Selain itu, dengan memisah rangkaian maka akan lebih

aman karena susunan beban tegangan tinggi tidak mudah menginterferensi sinyal digital karena terpisah jarak 3 cm.

4.2. Metode Pengukuran Kinerja Hasil Perancangan

4.2.1. RPM (*Rotation Per minute*)



Gambar 4.6 Pengukuran RPM menggunakan Tachometer infrared

Rotation per minute (RPM) merupakan nilai satuan kecepatan perputaran sebuah benda berdasarkan jumlah rotasi terhadap titik sumbu dalam satu menit. Parameter ini digunakan untuk mengukur performa *Output* sistem terhadap kemampuan untuk *mengkonversi* energi listrik ke mekanik dari hasil rancangan Minicont-EV. Untuk mengukur nilai RPM, diperlukan alat ukur berupa *takometer* dengan jenis mekanik maupun menggunakan infrared. Pengukuran yang dilakukan pada rancangan Minicont-EV ini menggunakan takometer infrared yang diarahkan ke beban *BLDC* yang sedang berputar seperti pada Gambar 4.6. Pengukuran RPM menggunakan infrared perlu media pemantul pada permukaan benda yang berotasi seperti pada lapisan plastik *doubletape*. Media pemantul ini akan memberikan sinyal pantulan ketika *BLDC* sudah mencapai satu putaran penuh.

4.2.2. Daya Listrik

Daya listrik merupakan jumlah energi yang diterima maupun dikeluarkan oleh sebuah sistem elektronis. Satuan daya listrik standar menggunakan watt atau disingkat sebagai (W). Nilai daya listrik dalam watt dapat muncul pada sistem apabila tegangan yang berada pada titik hubung memiliki nilai beban yang akan menerima dan menyerap energi total tersebut. Untuk mengukur nilai daya listrik pada sistem perlu mengetahui nilai arus yang mengalir dan tegangan sistem.

Gambar 4.7 merupakan gambar pengukuran arus sistem Minicont-EV dengan menggunakan *clampmeter*



Gambar 4.7 Pengukuran arus sistem Minicont-EV menggunakan Multiimeter Clamp

4.2.3. Komutasi Sinyal 3 fasa

Komutasi sinyal 3 fasa merupakan algoritma yang menentukan urutan fasa terhadap polaritas kutub-kutub pada motor *BLDC*. Algoritma ini akan menentukan arah putaran motor maupun menentukan karakteristik pengendalian dari motor tersebut. Pada sistem Minicont-EV ini, bentuk sinyal keluaran merupakan sinyal trapezoidal. Sehingga parameter yang digunakan untuk mengukur performa adalah nilai perbedaan sudut fase antar *output* beban dan kesesuaian urutannya berdasarkan karakteristik yang diinginkan.

BAB 5 HASIL PENGUKURAN DAN ANALISIS

5.1. Analisis Hasil

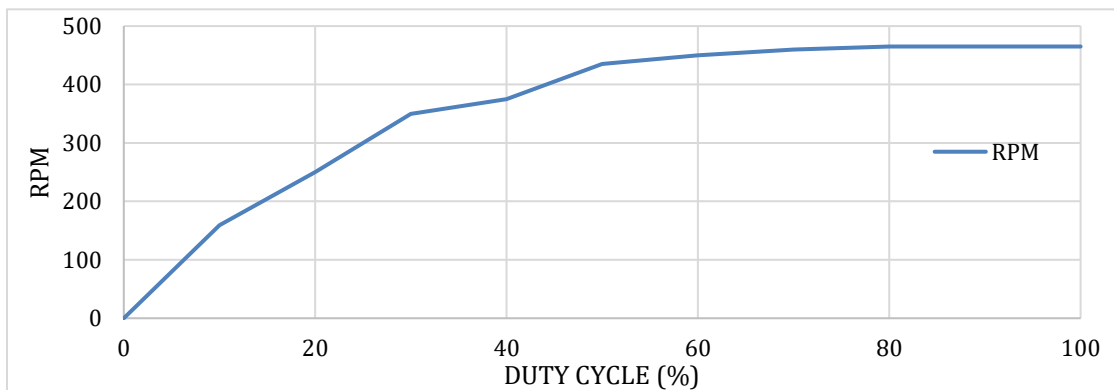
5.1.1. Hasil dan Analisis Pengujian Indikator

5.1.1.1. Pengukuran Performa

Tabel 5.1 Nilai Hubungan RPM dan Duty cycle Tanpa Beban Pada BLDC 500 watt

Duty cycle (%)	Arus (A)	RPM
10	0.1	159
20	0.2	250
30	0.3	350
40	0.4	375
50	0.5	435
60	0.5	450
70	0.5	460
80	0.5	465
90	0.5	465
100	0.6	465

Tabel 5.1 merupakan data pengukuran arus dan besaran kecepatan rotasi dari *output* Minicont-EV dalam kondisi tanpa beban. Parameter yang digunakan sebagai variasi adalah nilai *Duty cycle* dari input *throttle* untuk mengetahui performa dalam kondisi *output* minimum dan *output* maksimum. *Output* dari sistem *controller* tersebut terhubung ke motor *BLDC* 500 watt. Pada kondisi variasi *Duty cycle* minimum nilai arus yang muncul pada *output* beban adalah 0.1 A sedangkan RPM terukur adalah 159. Perubahan variasi ini terjadi secara eksponensial hingga RPM tersebut stagnan mulai pada *duty cycle* 80% yaitu sebesar 465 RPM. Kondisi stagnan ini dipengaruhi oleh batas kemampuan mekanik dari motor *BLDC* tersebut.



Gambar 5.1 Grafik Hubungan Antara Duty dan Kecepatan BLDC Tanpa Beban

Simulasi pada desain 1 memiliki nilai kecepatan BLDC 747 RPM yang lebih tinggi dari nilai kecepatan terukur pada pengujian *Gambar 5.1* dengan nilai maksimum 465 RPM. Perbedaan N (kecepatan) ini dipengaruhi oleh nilai p (*pole pairs*), semakin besar *pole pairs* maka kecepatan akan semakin kecil. Nilai *pole pair* pada desain 1 adalah 13 sedangkan pada pengujian menggunakan *pole pair* 4. Persamaan hubungan pole dengan kecepatan ditunjukkan oleh persamaan (5.1) sedangkan hubungan *pole pair* desain 1 dengan pengujian ditunjukkan oleh persamaan (5.2).

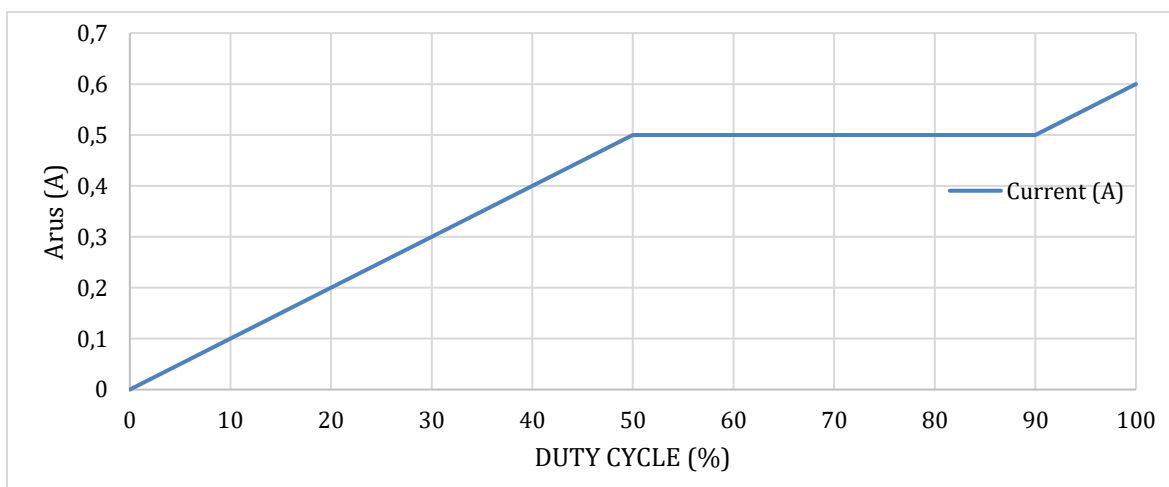
$$N = 120 \times \frac{f_{supply}}{p} \quad (5.1)$$

$$f_{supply1} = f_{supply2}$$

$$\frac{N_1}{120} \times p_1 = \frac{N_2}{120} \times p_2 \quad (5.2)$$

$$N_1 \times p_1 = N_2 \times p_2$$

Data arus yang terukur *Gambar 5.2* memiliki perubahan nilai secara linear pada *duty* 0-50%, stagnan pada *Duty* 50%- 90% dan kembali linear pada *Duty* setelah 90%. Perubahan ini dipengaruhi oleh metode *switching* pada *output* sinyal. Ketika proses *switching* 3 fasa terjadi, tegangan dari sistem akan memiliki nilai yang sebanding dengan besaran *duty cycle* tersebut. Semakin besar *Duty* maka tegangan rerata akan semakin besar mendekati nilai input *switching*. Hal ini menyebabkan perubahan arus yang mengikuti nilai *switching* dari *output* karena besaran energi yang berubah ketika tegangan rerata *output* berubah.



Gambar 5.2 Hubungan Duty dan Arus Pada Output BLDC 500 watt tanpa beban

5.1.1.2. Komutasi Sinyal Fasa ke *Ground Output*

Komutasi adalah urutan atau algoritma untuk mengalihkan arah aliran dari sistem 3 fasa. Sinyal pada masing-masing line 3 fasa memiliki urutan aliran arus khususnya ketika digunakan pada beban motor induktif 3 fasa. Urutan ini diperlukan untuk dapat menggerakkan motor induktif seperti *BLDC* dengan baik. Setiap line fasa terhubung ke kutub atau pole dalam *BLDC*, sehingga setiap pergantian arah aliran kutub diperlukan urutan agar *BLDC* dapat berputar dengan sempurna.

Jika urutan fasa tidak sesuai maka sistem akan memasuki kondisi Fault. Kondisi Fault adalah peristiwa *BLDC* tidak dapat berputar, kehilangan momentum torsi, maupun aliran arus yang terlalu besar. Ketika urutan pada fasa tidak sesuai, maka daya gerak yang dihasilkan pada setiap kutub akan memiliki vektor torsi yang berlawanan. Sehingga akan saling melemahkan torsi total yang muncul dari *output*.



Gambar 5.3 Sinyal fasa pada Duty 25%

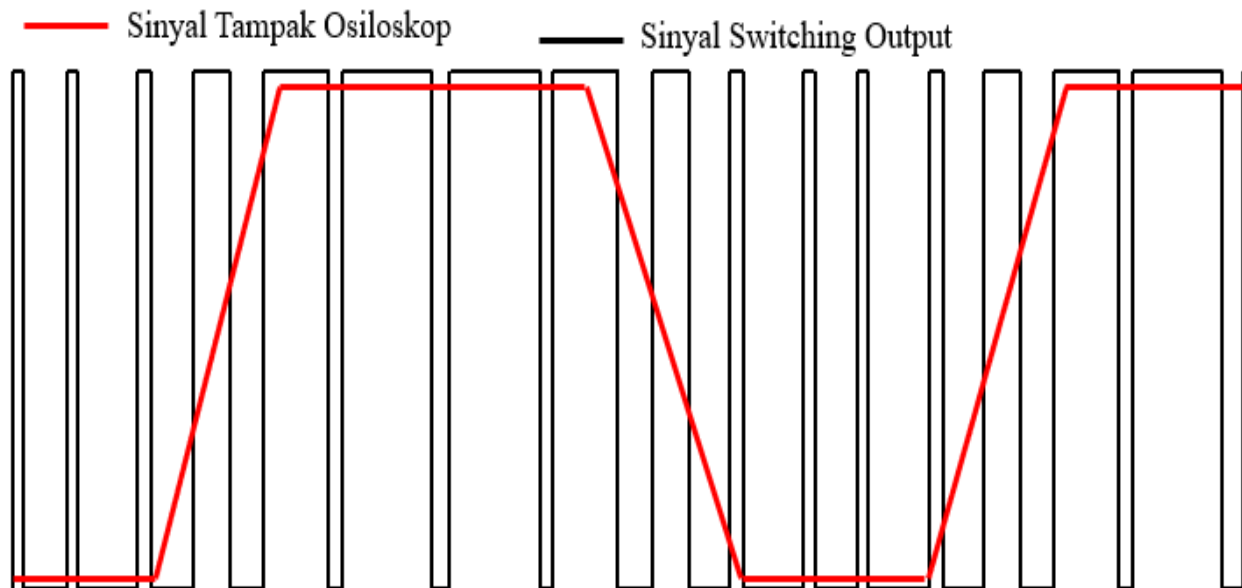


Gambar 5.4 Sinyal fasa pada Duty 50%



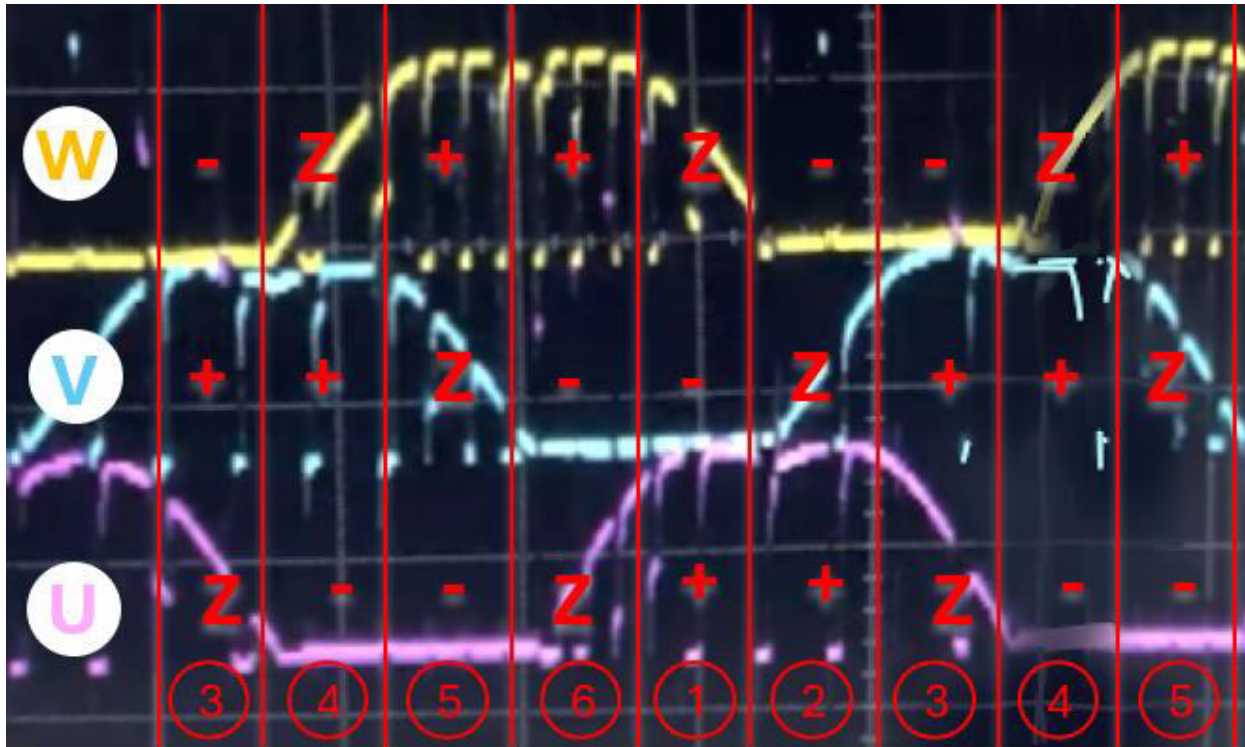
Gambar 5.5 Sinyal fasa pada Duty 75%

Sinyal 3 fasa pada *BLDC* memiliki karakteristik yang berbeda setiap jenisnya. Untuk *BLDC* yang digunakan sebagai uji coba Minicont-Ev menggunakan jenis jalur 3 fasa Wye dan memiliki pole magnet sebanyak 27. Hal ini mempengaruhi karakteristik dari sinyal *output* jika ada beban yang terhubung. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3, Gambar 5.4, dan Gambar 5.5 sinyal keluaran ini memiliki beda fase antara U dan V sebesar 120 derajat, U dan W sebesar 240 derajat. Perbedaan fase ini berasal dari komutasi fase berdasarkan karakteristik hall sensor yang juga memiliki beda fase tiap sensor 120 derajat.



Gambar 5.6 Perbandingan Sinyal Output Terhadap Sinyal Tampak Osiloskop

Sinyal yang tampak pada osiloskop yang ditunjukkan oleh Gambar 5.3, Gambar 5.4, dan Gambar 5.5 merupakan sinyal tegangan ekuivalen yang timbul saat terhubung dengan beban motor. Sinyal ekuivalen tersebut diilustrasikan oleh gambar Gambar 5.6. Tegangan ekuivalen pada masing-masing line fasa ditandai oleh garis warna merah oleh Gambar 5.6 dan sinyal *output switching* ditunjukkan oleh sinyal dengan garis warna hitam oleh Gambar 5.6. Tegangan ekuivalen tersebut berasal dari tegangan rerata *output switching*, semakin besar *duty cycle* maka tegangan rerata akan semakin besar. Perubahan sinyal ekuivalen tersebut terjadi secara linear sehingga tampak seperti sinyal trapezoidal.



Gambar 5.7 Komutasi Sinyal Yang Tampak Pada Osiloskop

Urutan komutasi diperlukan untuk mendapatkan putaran sempurna pada *BLDC*. Komutasi dilakukan dengan mengetahui keadaan masukan dari hall sensor dan menentukan nyala PWM dan kondisi setiap *mosfet*. Urutan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 5.7 sebagai urutan angka satu hingga enam. Masing-masing urutan memiliki kondisi fase yang berbeda. Sebagai contoh pada urutan 1, fasa U memiliki polaritas positif (+) yang mengalirkan arus ke fasa V dengan polaritas negatif. Sedangkan fasa W akan tertutup dengan kondisi impedansi yang tinggi. Setiap fase tidak bisa memiliki polaritas positif secara bersamaan atau negatif bersamaan karena dapat saling meniadakan vektor torsi pada beban induktif.

Komutasi pada pengendali *BLDC* ini terdiri dari komutasi urutan fasa yang berisi komutasi PWM pada setiap *mosfet*-nya. Urutan fasa yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7 memiliki kesesuaian dengan komutasi teoritis pada Gambar 2.5. Polaritas pada fasa U, V dan W sudah memiliki urutan yang sesuai. Sedangkan komutasi setiap *mosfet* pada rangkaian 3 fasa ditunjukkan oleh Tabel 5.2. H1, H2 dan H3 merupakan *mosfet* pada bagian *High side* untuk rangkaian *Bridge* sedangkan L1, L2 dan L3 adalah *mosfet* pada bagian *lowside* pada rangkaian *Bridge*. Urutan setiap nyala *mosfet High side* dan *Low side* ditentukan oleh kondisi input *hall* sensor. Ketika fasa *output* membutuhkan polaritas positif, maka PWM akan diaktifkan untuk *mosfet High side*. Sedangkan, untuk *output*

fasa polaritas negatif maka *mosfet Low side* cukup diaktifkan pada tegangan *threshold* hingga *mosfet* menyala secara penuh. Jika fasa memerlukan polaritas impedansi tinggi (*Z*) maka *mosfet High side* dan *Low side* dinonaktifkan dengan memberikan tegangan input di bawah *threshold gate mosfet*. PWM pada topologi *fullbridge* 3 fasa ini hanya perlu diaktifkan untuk salah satu bagian baik *High side* maupun hanya *Low side*. Jika PWM diaktifkan secara bersamaan maka akan terjadi *switching loss* karena karakteristik pewaktuan yang berbeda pada setiap *hardware* sehingga memerlukan rangkaian dengan tingkat keakurasian waktu tinggi yang sulit dicapai.

Tabel 5.2 Urutan Komutasi fase beban berdasarkan sensor posisi hall

Urutan	HALL	H1	L1	H2	L2	H3	L3	fasa U	fasa V	fasa W
1	011	PWM	Off	Off	ON	Off	Off	+	-	Z
2	001	PWM	Off	Off	Off	Off	On	+	Z	-
3	101	Off	Off	PWM	Off	Off	On	Z	+	-
4	100	Off	On	PWM	Off	Off	Off	-	+	Z
5	110	Off	On	Off	Off	PWM	Off	-	Z	+
6	010	Off	Off	Off	On	PWM	Off	Z	+	-

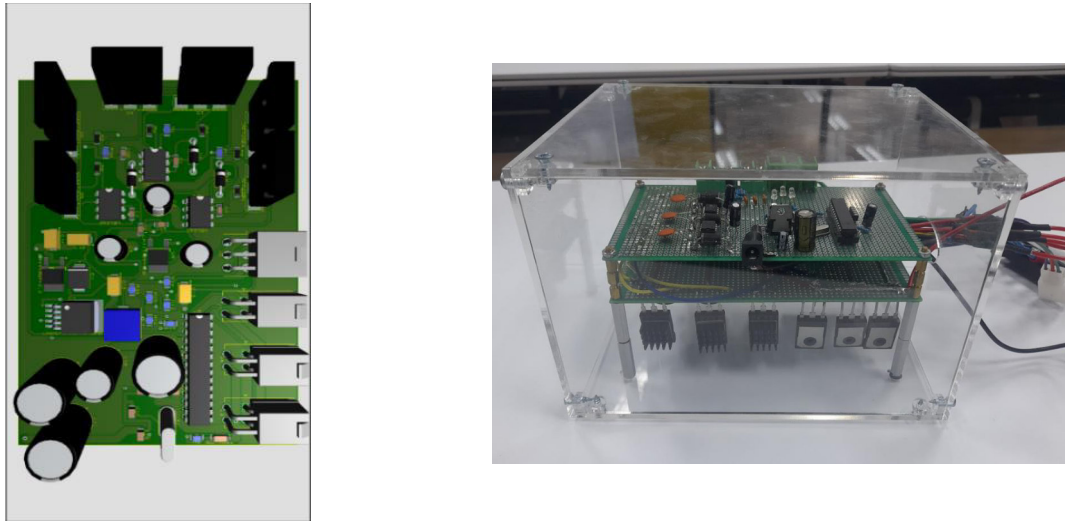
IMCO digunakan sebagai pembandingan performa untuk mengetahui skala dari sistem Minicont-EV. IMCO merupakan hasil dari Tugas akhir mahasiswa UII tahun 2022 [22]. IMCO memiliki spesifikasi sistem yang mirip dengan Minicont-EV, namun terdapat perbedaan dalam jumlah kapasitas beban dan daya hantarnya seperti ditunjukkan oleh Tabel 5.3. Minicont-EV memiliki spesifikasi PWM yang lebih tinggi, namun memiliki *output* RPM lebih rendah dari IMCO karena spesifikasi mekanik dari Alat Uji *BLDC* yang hanya mampu mencapai 465 RPM. Selain itu Karena Daya hantar Minicont-EV lebih rendah dari IMCO, maka jumlah spesifikasi komponen Minicont-EV lebih rendah sehingga Minicont memiliki Harga Produk Lebih rendah.

Tabel 5.3 Perbandingan performa antara sistem yang dibuat dengan sistem lain

No	Fitur/Komponen	MiniCont-EV (500 W)	IMCO (1000 W)
1	Kecepatan Sistem (RPM)	465	767
2	Arus Maksimum (A)	12	40
3	Tegangan Sistem	48V	48V
4	PWM	62.5 kHz	30 kHz
3	Harga (Rp)	Rp543.650,00	Rp 1.072.000,00

5.1.2. Pemenuhan Spesifikasi Sistem

5.1.2.1. Perbandingan Spesifikasi Elektris dan Mekanik



Gambar 5.8 Perbandingan Desain Usulan (kiri) dan Realisasi (kanan)

Desain pada realisasi dan usulan memiliki perbedaan pada spesifikasi fisik dan elektrisnya ditunjukkan oleh Tabel 5.4. Pada Tabel 5.4, Ukuran dimensi volume realisasi lebih besar dari Usulan seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.8. Hal ini disebabkan oleh beberapa sistem yang ada pada usulan tidak dapat direalisasikan karena parameter komponen usulan tidak sesuai dengan kebutuhan secara riil. Selain itu, beberapa komponen usulan menggunakan komponen yang tidak dapat diaplikasikan karena memiliki spesifikasi elektris yang tidak aman seperti arus maksimum di bawah *rating* arus beban. Pada realisasi terdapat tambahan komponen yang digunakan sebagai pengaman elektris seperti dioda untuk rektifikasi arus balik saat regenerasi *breaking*. yang tidak ada pada usulan, hal ini menyebabkan ukuran dimensi lebih besar.

Tabel 5.4 Perbandingan usulan dan hasil perancangan sistem

No	Spesifikasi	Usulan	Realisasi
1	Dimensi (panjang x lebar x tinggi)	150 x 80 x 42mm	140 x 120 x 80 cm
2	Berat (gram)	700 gram	800 gram
3	RPM maksimum pada beban <i>BLDC</i> 500 Watt	747 (<i>BLDC</i> 4 poles)	465 (<i>BLDC</i> 26 poles)
4	Tegangan maksimum	60V	60V
5	Arus maksimum	12 A	12 A
6	Frekuensi PWM	62.5 kHz	62.5kHz

Spesifikasi elektris pada usulan didapat pada simulasi menggunakan *BLDC* 500 watt dengan 4 *pole*. Sedangkan pada realisasi Diuji pada *BLDC* 500 watt 26 pole. Perbedaan pole pada

usulan dan realisasi menyebabkan kecepatan maksimum dari beban berbeda, semakin besar pole maka torsi semakin besar namun mengurangi kecepatan maksimum. Sedangkan pada tegangan maksimum, arus maksimum dan frekuensi PWM memiliki nilai yang sama di usulan karena komponen simulasi dan komponen realisasi di pasaran memiliki nilai yang sama. Sehingga spesifikasi minimum pada usulan hanya dapat dicapai sebagian karena perbedaan parameter rancangan baik pada usulan maupun realisasi.

5.1.2.2. Analisis Spesifikasi TKDN

Tabel 5.5 Perbandingan Harga TKDN dan Non TKDN

No	Nama	Nilai non TKDN	Nilai TKDN
1	Capacitors 47uF	-	Rp4.000,00
2	Capacitors 220nF	-	Rp3.000,00
3	Capacitors 4.7nF	-	Rp3.000,00
4	Capacitor 180uF	-	Rp15.000,00
5	Resistors 4.7	-	Rp2.000,00
6	Resistor 330	-	Rp2.000,00
7	Resistors 10k	-	Rp1.000,00
8	Resistors 1k	-	Rp1.000,00
9	Resistors 200	-	Rp3.900,00
10	Resistor 33k	-	Rp3.900,00
11	Resistor 10k	-	Rp1.350,00
12	IC Micro Atmega328p	Rp50.000,00	-
13	Gate Driver IR2104	Rp60.000,00	-
14	Kabel 0.75mm	-	Rp45.000,00
15	PCB	-	Rp15.000,00
16	LED	-	Rp2.000,00
17	regulator LM317	Rp5.000,00	-
18	regulator LM2596	Rp25.000,00	-
19	Dioda hyper fast 15A	Rp60.000,00	-
20	Dioda IN4001	-	Rp1.500,00
21	Mosfet IRFP4110	Rp180.000,00	-
22	casing	-	Rp60.000,00
23	Desain dan Perakitan	-	Rp500.000,00
Total per Bagian TKDN		Rp380.000,00	Rp663.650,00
Persentase TKDN		36,41%	63,59%
Total Harga Produk Minicont-EV		Rp1.043.650,00	

Berdasarkan Peraturan Perindustrian Nomor 22 Tahun 2020, minimum nilai Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) untuk barang digital adalah 30% dan non TKDN sebesar 70% [23]. Berdasarkan peraturan ini, produk Minicont-EV telah mencapai nilai TKDN sebesar 30% pada Tabel 5.5. Nilai persentase tersebut telah diakumulasi berdasarkan pengurangan komponen non TKDN yang berasal maupun diproduksi oleh negara selain Indonesia. Komponen TKDN pada Tabel 5.5 adalah komponen dasar elektronika, kabel, maupun *casing* yang diproduksi oleh Indonesia. Persentase non TKDN sebesar 69% masih cukup tinggi, mengingat semua komponen utama seperti MCU, *gate driver* maupun *Mosfet* masih diproduksi di luar Indonesia. Namun angka 30% ini masih dapat ditingkatkan dengan mengganti dengan komponen lain yang dapat diproduksi dalam negeri.

5.1.3. Pengalaman Pengguna

Tabel 5.6 Pengalaman Pengguna

No	Fitur/Komponen	Capaian	Aksi/Perbaikan
1	<i>Switching Mosfet</i>	Frequency <i>switching mosfet</i> di bawah nilai minimum untuk dapat bekerja.	Memperkecil ukuran resistor <i>gate mosfet</i> , meningkatkan <i>frequency PWM</i> .
2	Putaran <i>BLDC</i>	<i>BLDC</i> berputar perlu bantuan tangan dan sering macet.	Mengubah jenis dioda <i>rectifier</i> untuk <i>bootstrap</i> menjadi <i>Hyper Fast recovery diode</i> untuk <i>bootstrap</i> sehingga memiliki respon yang lebih cepat tanpa macet.
3	Proteksi Short Circuit	<i>Mosfet</i> sering mengalami <i>cross conduction</i> saat menggunakan IR2101 pada topologi 3 fasa.	Mengganti IC <i>gate driver</i> menjadi IR2104 yang memiliki proteksi <i>cross conduction</i> pada topologi 3 fasa.
4	Proteksi BEMF	Sumber tegangan mengalami arus balik berupa sinyal AC pada saat sistem <i>regenerative braking</i> .	Menambahkan diode <i>hyper fast</i> arus tinggi secara paralel pada topologi 3 fasa. Sehingga arus balik menjadi searah.
5	Proteksi DC <i>stepdown</i>	DC <i>stepdown</i> merusak komponen mikrokontroler karena tegangan lonjakan pada saat tertentu.	Menambahkan dioda pengaman untuk mengalihkan kelebihan tegangan kembali ke sumber.
6	Proteksi Kerusakan <i>Mosfet</i>	<i>Mosfet</i> berpotensi rusak pada saat <i>bootstrapping</i> karena beda	Menambahkan dioda zener secara paralel pada <i>gate</i> ke source untuk memblokir tegangan yang

No	Fitur/Komponen	Capaian	Aksi/Perbaikan
		potensial <i>gate</i> ke source melebihi batas maksimum.	melebihi batas maksimum pada <i>gate mosfet</i> .
7	Respon Mikrokontroller	Mikrokontroller selalu memberikan tanggapan sinyal sensor <i>hall</i> dengan lambat dan <i>switching</i> pada <i>mosfet</i> tidak sesuai urutan.	Mengubah kode program dari <i>library arduino</i> menjadi bentuk kode program AVR dengan <i>interrupt</i> agar respon lebih cepat.
8	DC <i>stepdown</i>	IC <i>stepdown</i> memiliki potensi besar untuk rusak karena batas range tegangan yang kecil untuk sistem dengan beban induktif.	Mengganti LM117 menjadi LM317 karena memiliki range tegangan lebih besar dan memiliki potensi kerusakan lebih rendah.

Pada proses perancangan Minicont-Ev terdapat berbagai perubahan dan revisi parameter desain seperti ditunjukkan oleh Tabel 5.6. Parameter pada usulan memiliki nilai yang berasal dari simulasi tanpa menghitung transisi maupun *transient* elektrik pada aplikasi riil. Hal ini menyebabkan beberapa parameter perlu diganti agar dapat menghasilkan performa yang dibutuhkan pada sistem.

5.1.3.1. Perhitungan Parameter *gate resistor*

$$\Delta_{ts}(\text{rising on}) = Q_g \times \frac{R_g}{V_{gs}} \quad (5.3)$$

$$1 \mu s = 234 \text{ nC} \times \frac{R_g}{12 \text{ V}} \quad (5.4)$$

$$R_g = 51.28 \text{ ohm} \rightarrow 47 \text{ ohm} \quad (5.5)$$

Gate resistor adalah resistor yang digunakan untuk mengurangi arus yang masuk ke *gate resistor* dan menghindari *short circuit*. Perhitungan yang digunakan saat merevisi Parameter *gate resistor* ditunjukkan oleh (5.3). Q_g merupakan nilai kapasitans yang diperoleh dari *datasheet* Komponen *mosfet*. R_g merupakan nilai *gate resistor*. V_{gs} merupakan tegangan *gate* ke source *mosfet* yang akan dibangkitkan oleh input. Δ_{ts} merupakan waktu *switching* maksimum dari PWM mikro kontroller.

Dengan menghitung nilai *switching* maksimum pada (5.5) sehingga didapatkan nilai *gate resistor* oleh (5.5). Nilai resistor 51.28 Ω tidak tersedia di pasaran sehingga digunakan nilai 47 Ω .

Perubahan nilai *gate* resistor dari usulan 10k Ω menjadi 47 Ω dapat mengurangi waktu *transient* dari *switching mosfet*. Hal ini akan menambah efisiensi dari *switching* ke *output* 3 fasa dan memperhalus putaran beban *BLDC*.

5.1.3.2. Perhitungan Kapasitor *Bootstrap*

Kapasitor *Bootstrap* merupakan penyimpan energi pada *gate driver* ketika melakukan *switching* pada topologi *mosfet* yang memiliki jenis *High side* dan *lowside*. Nilai kapasitansi ini harus sesuai dengan spesifikasi minimum energi yang diperlukan pada *gate mosfet* namun tidak dapat terlalu besar karena dapat menghasilkan riak sinyal maupun mengubah *transient mosfet* menjadi lebih lambat. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan untuk mendapatkan nilai kapasitor *boot* yang sesuai.

$$C_{boot} = 10 \times \frac{Q_g}{V_{boot}} \quad (5.6)$$

$$C_{boot} = 10 \times \frac{Q_g}{(V_{dd} - diode)} \quad (5.7)$$

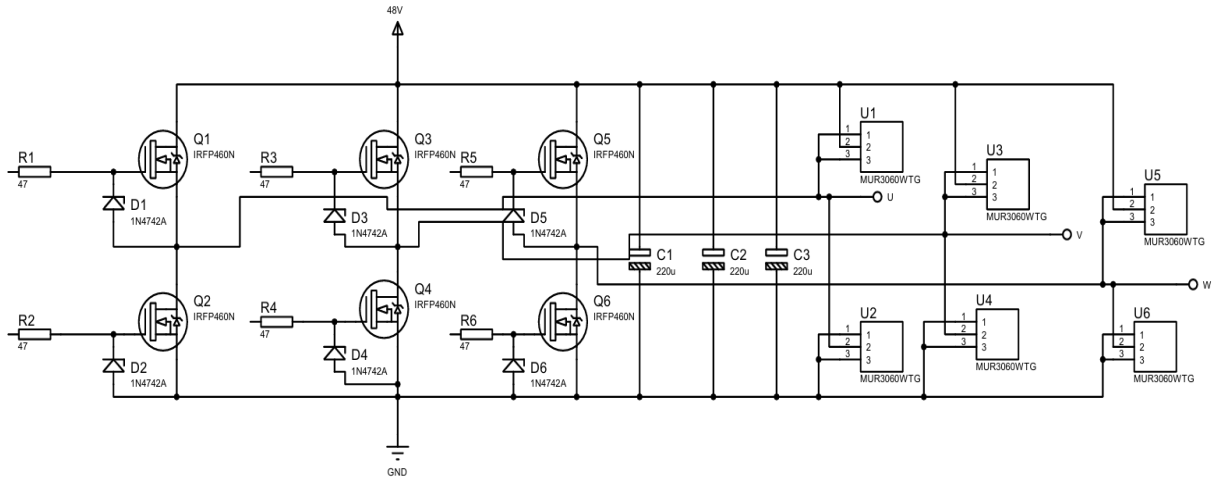
$$C_{boot} = 10 \times \frac{234 \text{ nC}}{(12V - 0.3V)} \quad (5.8)$$

$$C_{boot} = 10 \times 20\text{nF} \rightarrow 220\text{nF}$$

Pada (5.6), C_{boot} merupakan kapasitor *boot*. Q_g merupakan muatan dari *gate mosfet*. V_{dd} merupakan tegangan sumber kapasitor setelah melalui rektifikasi dioda seperti ditunjukkan oleh (5.7). rasio perhitungan akan dikalikan 10 kali karena pada saat *switching* akan terjadi pengisian dan pengosongan kapasitor hingga paling cepat 10 kali pada satu siklus fasa. Sehingga hal ini dapat mengantisipasi kapasitor kehabisan muatan saat proses *bootstrapping*.

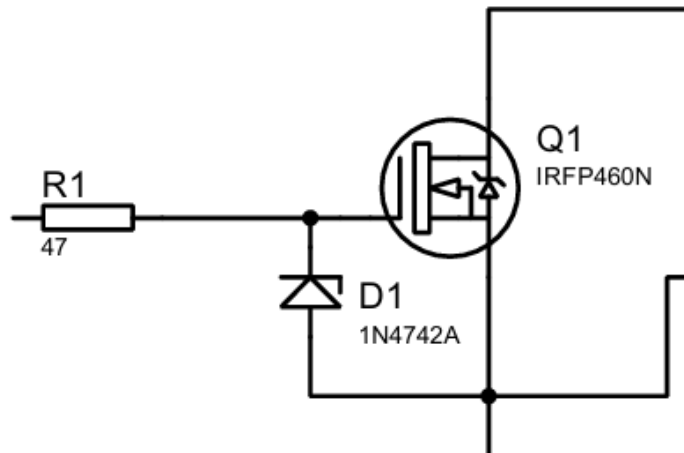
5.1.3.3. Penambahan Pengaman tegangan lebih dan arus balik

Pada saat sistem pengendali *BLDC* mengurangi kecepatan beban maupun melakukan regeneratif *breaking*, terdapat arus balik yang berasal dari konversi energi kinetik beban ke listrik. Hal ini terjadi karena beda potensial beban lebih tinggi dari sumber, sehingga arus kembali dari beban ke sumber yang berpotensi merusak sumber tegangan rangkaian. Untuk mengatasi hal ini diperlukan dioda penyearah seperti yang ditunjukkan oleh rangkaian Gambar 5.9. terdapat dioda U1, U2, U3, U4, U5 dan U6 yang diletakkan secara paralel terhadap rangkaian 3 fasa. Sehingga arus balik dari beban akan berubah menjadi searah dan akan disimpan oleh sumber.



Gambar 5.9 Rangkaian 3 fasa dengan pengaman dioda secara paralel

Dioda Zener adalah dioda yang memiliki karakteristik menyalurkan arus listrik mengalir ke arah yang berlawanan jika tegangan yang diberikan melampaui batas. Dioda ini dapat digunakan untuk memberikan keamanan tambahan pada *gate mosfet*. Tegangan maksimum yang dapat melalui *gate mosfet* umumnya adalah 20V, namun pada penggunaan bootstrap *mosfet* kadang terjadi lonjakan tegangan melebihi batas. Oleh karena itu perlu digunakan pengaman dioda zener secara paralel dari *gate* ke *source* agar *mosfet* tidak mudah rusak seperti ditunjukkan oleh komponen D1 pada Gambar 5.10 .



Gambar 5.10 Dioda zener paralel pada gate ke source mosfet

5.1.4. Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya

Alur perencanaan waktu pada Tabel 5.7 menunjukkan perubahan proses pengerjaan Tugas Akhir 2. Pada poin 1 Tabel 5.7, pembelian alat dan bahan pada realisasi memiliki waktu yang berbeda dan lebih lama dari usulan karena proses revisi produk yang masih melaksanakan pembelian alat dan bahan. Selain itu pada Perancangan Sistem, dilaksanakan setelah pembelian alat dan bahan yang memiliki waktu perbedaan satu bulan dari usulan, yaitu pada Maret. Sedangkan pada testing dan validasi menggunakan waktu yang lebih lama dari usulan karena pengetesan pada sistem secara terpisah. Oleh karena itu waktu pada *expo* dan pengumpulan laporan akhir dilaksanakan setelah testing yaitu pada bulan Juli hingga Agustus.

Tabel 5.7 Kesesuaian antara usulan dan realisasi timeline pengerjaan Tugas Akhir 2

No	Kegiatan	Usulan waktu	Realisasi Pelaksanaan
1	Pembelian alat dan bahan	Januari – Februari	Januari - Maret
2	Perancangan sistem dengan usulan	Februari– Juni	Maret - Juni
3	Testing dan Validasi	Juni-Juli	April-Juni
4	Expo dan pengumpulan laporan akhir	Agustus	Juli - Agustus

Total biaya yang ditunjukkan pada Tabel 5.8 merupakan biaya yang dikeluarkan mulai dari pembelian alat dan bahan dan alat sebagai penguji sistem. Biaya yang digunakan pada usulan memiliki total yang lebih tinggi dari realisasi. Hal ini sebagian besar dipengaruhi oleh harga alat uji yaitu baterai sebagai sumber tegangan dan *BLDC* sebagai alat uji beban rangkaian. Harga komponen uji realisasi memiliki harga yang lebih rendah karena beban uji *BLDC* menggunakan merek lain namun memiliki spesifikasi yang sama, sehingga didapatkan harga yang lebih rendah. Selain itu terdapat beberapa komponen biaya yang berbeda dari usulan dan realisasi setelah dilakukan perubahan desain dan revisi desain pada realisasi.

Tabel 5.8 Perbandingan Biaya Tugas Akhir 2 usulan terhadap realisasi

No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga	Kuantitas	Total Harga
1	BLDC 500w	1	Rp2.000.000,00	1	650.000,00
2	Baterai Pack 48V 12Ah	1	Rp1.800.000,00	1	1.800.000,00
3	Capacitors 2.2uf	3	Rp5.000,00	-	-
4	Capacitors 100uf	3	Rp12.000,00	-	-
5	Capacitors 47uF	1	Rp4.000,00	1	4.000,00
6	Capacitors 0.1uF	2	Rp1.200,00	-	-
7	Capacitors 220uF	2	Rp4.000,00	-	-
8	Capacitors 220nF	-	-	3	3.000,00
9	Capacitors 4.7nF	-	-	3	3.000,00
10	Capacitor 180uF	-	-	3	15.000,00
11	Resistors 4.7	-	-	3	2.000,00
12	Resistor 330	-	-	3	2.000,00
13	Resistors 10k	1	Rp1.000,00	1	1.000,00
14	Resistors 1k	1	Rp1.000,00	1	1.000,00
15	Resistors 200	6	Rp3.900,00	6	3.900,00
16	Resistor 33k	6	Rp3.900,00	6	3.900,00
17	Resistor 10k	3	Rp1.350,00	3	1.350,00
18	IC Micro Atmega328p	1	Rp50.000,00	1	50.000,00
19	Gate Driver IR2101S	3	Rp48.000,00	-	-
20	Gate Driver IR2104			3	60.000,00
21	Kabel 0.75mm	10	Rp45.000,00	10	45.000,00
22	PCB	2	Rp15.000,00	2	15.000,00
23	LED	3	Rp2.000,00	3	2.000,00
24	regulator LM317	-	-	1	5.000,00
25	regulator LM2596	1	Rp25.000,00	1	25.000,00
26	regulator LM117	1	Rp5.000,00	-	-
27	Dioda hyper fast 15A	-	-	6	60.000,00
28	Dioda IN4001	3	1500	3	1.500,00
29	Mosfet IRFP260N	6	Rp60.000,00	-	-
30	Mosfet IRFP4110	-	-	6	180.000,00
31	Casing Akrilik	-	-	1	60.000,00
	Total		Rp4.088.850,00		Rp2.993.650,00

Tabel 5.9 Realisasi aktivitas pelaksanaan tugas akhir 2

No	Hari, Tanggal, Durasi (jam atau hari)	Aktivitas	Pelaksana
1	Kamis, 29 Februari 2024, 3 jam	Pembelian Alat	Alvin
2	Kamis, 7 Maret 2024, 2 jam	Menyolder komponen	Alvin, Agus
3	Kamis, 14 Maret 2024, 2 jam	Menyolder komponen	Alvin, Agus
4	Kamis, 21 Maret 2024, 6 jam	Menyusun kode program dan menguji ke papan mikrokontroler	Alvin, Agus
5	Kamis, 28 Maret 2024, 2 jam	Mengecek kode program yang dibuat agar sesuai dengan <i>hardware PCB</i>	Agus
6	Kamis, 4 April 2024, 4 jam	Melakukan revisi terhadap <i>PCB</i>	Alvin, Agus
7	Kamis, 11 April 2024, 2 jam	Melakukan pengecekan melalui osiloskop untuk melihat fase dari <i>BLDC</i>	Alvin, Agus
8	Kamis, 18 April 2024, 4 jam	Melakukan penyesuaian pada <i>PCB</i>	Alvin, Agus
9	Kamis, 25 April 2024, 4 jam	Mengganti beberapa komponen yang ada di <i>PCB</i>	Alvin
10	Kamis, 2 Mei 2024, 2 jam	Melakukan pengecekan melalui osiloskop	Alvin, Agus
11	Kamis, 9 Mei 2024, 2 jam	Melakukan percobaan pertama dengan menyambungkan <i>BLDC</i> ke <i>psu</i> dan mini kontroler	Alvin, Agus
12	Kamis, 16 Mei 2024, 2 jam	Melakukan beberapa percobaan dan penyesuaian parameter	Alvin, Agus
13	Kamis, 23 Mei 2024, 4 jam	Mengganti beberapa komponen yang terbakar di <i>PCB</i>	Alvin, Agus
14	Kamis, 30 Mei 2024, 2 jam	Mengganti <i>PCB</i> 4 layer menjadi <i>PCB</i> bolong	Agus
15	Kamis, 6 Juni 2024, 4 jam	Mengganti beberapa komponen yang mati	Agus
16	Kamis, 13 Juni 2024, 2 jam	Membuat <i>casing</i> untuk mini kontroler	Alvin
17	Kamis, 20 Juni 2024, 2 jam	Melakukan Percobaan dengan berhasil	Alvin, Agus
18	Kamis, 27 Juni 2024, 2 jam	Memproses data dan melakukan analisis	Alvin, Agus
19	Kamis, 4 Juli 2024, 2 jam	Membuat laporan akhir	Alvin, Agus

Realisasi pelaksanaan pada Tabel 5.9 berisi kegiatan mulai dari pembelian hingga penyusunan laporan akhir. Kegiatan berjalan sesuai rencana mulai 29 Februari 2024 hingga 4 April 2024. Namun muncul kendala yang perlu disesuaikan karena parameter desain yang tidak sesuai dengan keadaan riil sistem. Oleh karena itu dilakukan revisi mulai dari 4 April 2024 hingga 6 Juni 2024. Setelah revisi kegiatan dilanjutkan ke pengambilan data hingga penyusunan laporan karena Minicont-Ev sudah mencukupi beberapa target hasil pada usulan,

5.2. Dampak Implementasi Sistem

Produk Minicont-Ev memiliki dampak pada ekonomi dalam negeri karena mendukung kebijakan pemerintah berupa peningkatan nilai TKDN. Dengan meningkatnya nilai TKDN ini industri dan penyerapan sumber daya alam dalam negeri akan meningkat. Selain itu, perancangan ini juga mendukung kemajuan teknologi dalam bidang kendaraan listrik dalam negeri, mengingat produksi kendaraan listrik dalam negeri yang masih rendah.

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem Minicont-EV didapat performa spesifikasi kelistrikan ,mekanik dan TKDN dari spesifikasi yang diusulkan. Performa kelistrikan seperti rating arus dan tegangan telah sesuai dengan usulan yaitu 12A dan 60V. Sedangkan Performa realisasi mekanik beban jauh dari target yaitu 465 RPM sedangkan pada usulan sebesar 747 RPM. Performa realisasi tersebut dicapai dengan metode pengendalian melalui sinyal trapezoidal dan topologi *close loop*. Dengan metode pengendali ini, sistem dapat menyesuaikan fase beban dengan sistem sehingga mengurangi kemungkinan sistem mengalami *Fault*. Untuk nilai spesifikasi TKDN mencapai 63.5% yang berada pada standar minimum regulasi kementerian perindustrian. Nilai TKDN ini masih cukup rendah karena komponen utama seperti *mosfet* dan mikrokontroller masih diproduksi oleh negara Selain Indonesia.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil perancangan Minicont-EV, terdapat kekurangan yang dapat digunakan dijadikan sebagai bahan perbaikan oleh perancang kendali *BLDC* pada kendaraan listrik kedepannya:

- Peningkatan resolusi sistem mikrokontroller untuk mendapatkan sinyal yang memiliki bentuk lebih mendekati keadaan sempurna.
- Penambahan fitur mode kecepatan untuk mendapatkan berbagai jenis torsi sesuai dengan kebutuhan.
- Penggunaan komponen yang memiliki paket pengemasan lebih kecil sehingga memudahkan dalam penyusunan papan rangkaian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. of E. and M. R. Republic of Indonesia, “handbook of energy and economic statistics of indonesia 2022,” 2022.
- [2] V. Tulus and P. Sidabutar, “Kajian pengembangan kendaraan listrik di Indonesia: prospek dan hambatannya,” 2020.
- [3] cakrawati Sudjoko, “Strategi Pemanfaatan Kendaraan Listrik Berkelanjutan Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi Karbon,” *Strategi Pemanfaatan Kendaraan Listrik Berkelanjutan Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi Karbon*, vol. 2, no. Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia, pp. 54–58, 2021.
- [4] Presiden Republik Indonesia, “Peraturan pemerintah no 55 Tahun 2019,” 2019.
- [5] D. Dewa Kadek Darmada, “Mengupas Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) Pada Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah (Studi Imperatif Pengadaan IT Kanwil Kemenkumham NTB),” *Jurnal Pengadaan Barang/Jasa*, vol. 1, no. 2, 2022, doi: 10.55961/jpbj.v1i2.27.
- [6] K. Kolano, “Improved sensor *control* method for *BLDC* motors,” *IEEE Access*, vol. 7, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960580.
- [7] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Z. Alam, and A. N. Nordin, “Control *BLDC* motor speed using PID controller,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 3, 2020, doi: 10.14569/ijacsa.2020.0110359.
- [8] P. Astuti and H. Masdi, “Sistem Kendali Kecepatan Motor *BLDC* Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno,” *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.24036/jtein.v3i1.216.
- [9] S. Patil, R. Saxena, and Y. Pahariya, “Performance Comparison of SRM, PMSM & *BLDC* Motor Drives via Experimentation in Laboratory for EV Application,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 11, no. 2s, 2023.
- [10] C. Xia, *PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES AND CONTROLS*, 1st ed., vol. 1. Tianjian: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
- [11] I. Janpan, R. Chaisricharoen, and P. Boonyanant, “Control of the brushless DC motor in combine mode,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 279–285. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1268.
- [12] A. C. G and A. Parthan, “Position and Speed Control of *BLDC* Motor using Hall Sensor,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, no. 32, 2015.
- [13] H. Zhang, G. Liu, X. Zhou, and S. Zheng, “High-Precision Sensorless Optimal Commutation Deviation Correction Strategy of *BLDC* Motor with Asymmetric Back EMF,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 8, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3027010.

- [14] A. Jaya, P. Era, M. Fauziah, F. Murdianto, G. Prabowo, and M. Rusli, *Design of PID-fuzzy for speed control of brushless DC motor in dynamic electric vehicle to improve steady-state performance*. 2017. doi: 10.1109/ELECSYM.2017.8240399.
- [15] T. Triyono, “APLIKASI KONTROL PID DENGAN SOFTWARE MATLAB,” *Jurnal Teknik*, vol. 4, no. 2, 2017, doi: 10.31000/jt.v4i2.390.
- [16] V. J. Vandoren, “Examining the fundamentals of PID control,” *Control Engineering*, vol. 43, no. 2, 1996.
- [17] I. Hudati, A. P. Aji, and S. Nurrahma, “Kendali Posisi Motor DC dengan Menggunakan Kendali PID,” *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 2, no. 2, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.71148.
- [18] D. Chowdhury, M. Chattopadhyay, and P. Roy, “Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor,” *Procedia Technology*, vol. 10, 2013, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.362.
- [19] C. Andrews, M. Soltero, and M. Mesganaw, “Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors,” 2023. [Online]. Available: www.ti.com
- [20] D. Mohanraj *et al.*, “A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications,” *IEEE Access*, vol. 10. 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175011.
- [21] BSN, “PUIL 2020 – Bagian 7-22 – Persyaratan untuk instalasi atau lokasi khusus – Suplai untuk kendaraan listrik,” 2020
- [22] M. Rais and R. Wisthi Drestanto, “IMCO: Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor BLDC untuk Kendaraan Motor Listrik,” Yogyakarta, Jul. 2022. Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.uii.ac.id/bitstream/handle/123456789/40338/17524019.pdf?sequence=1>
- [23] Peraturan Menteri Perindustrian, “Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 22 Tahun 2020 tentang Ketentuan dan Tata Cara Penghitungan Nilai Tingkat Komponen Dalam Negeri Produk Elektronika dan Telematika.” Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/166989/permenperin-no-22-tahun-2020>

LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Tabel Perbaikan

TABEL PERBAIKAN LAPORAN AKHIR CAPSTONE

MAHASISWA #1 : 20524063 Agus Setiawan :
MAHASISWA #2 : 20524070 Muhammad Alvin

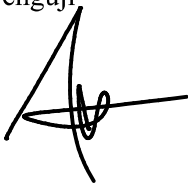
JUDUL/TOPIK : MiniCont-EV: Mini Controller Untuk Electric Vehicle Daya Rendah

No	Saran penguji	Perbaikan oleh mahasiswa	Halaman	Status
1	Merevisi perbandingan desain, khususnya harga yang tidak berbeda jauh	Mengganti perbandingan harga dengan parameter karakteristik sistem pengendalian	24	Approved
2	Perbedaan hasil pengujian dan simulasi butuh perhitungan	Menambahkan perhitungan perbedaan pole dan rpm pada perbedaan hasil pengujian	33	Approved

Yogyakarta, 5 Agustus 2024

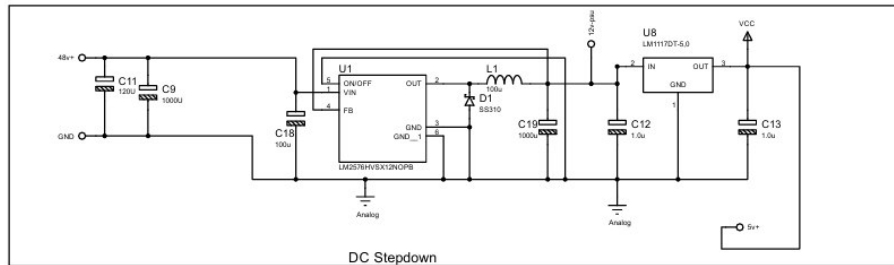
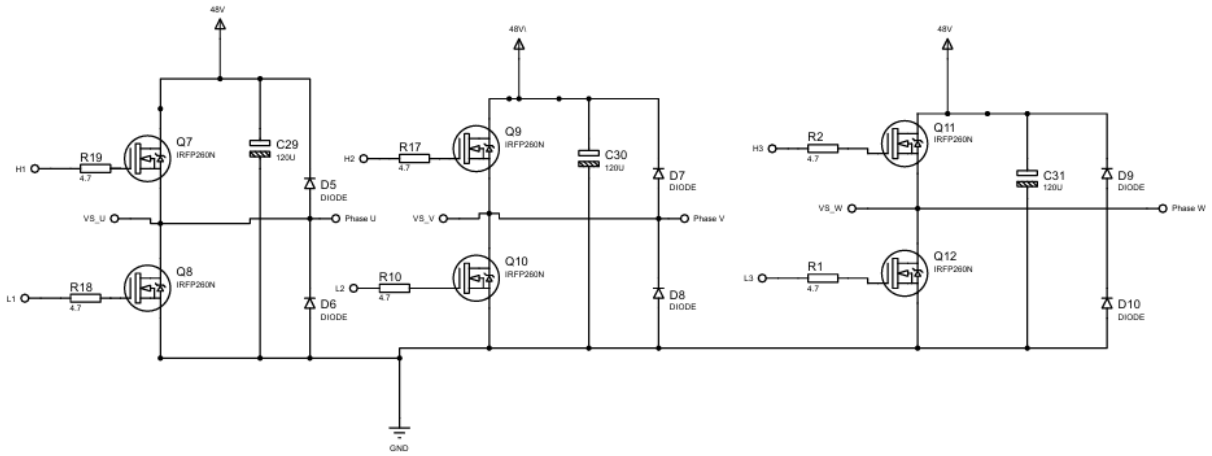
Menyetujui,

Penguji

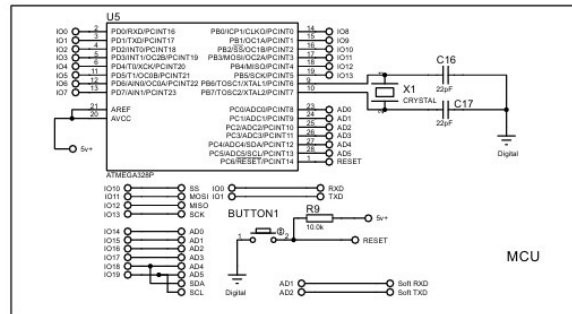


Iftitah Imawati, S.T., M.Eng

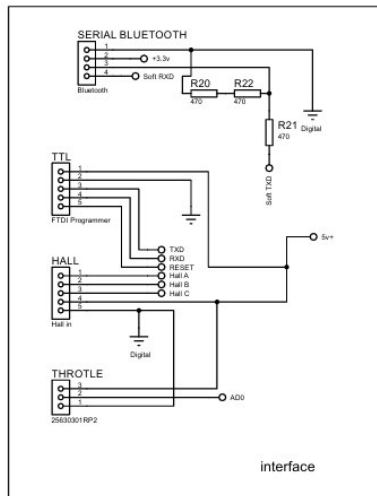
Lampiran 1.2 Skematik Sistem



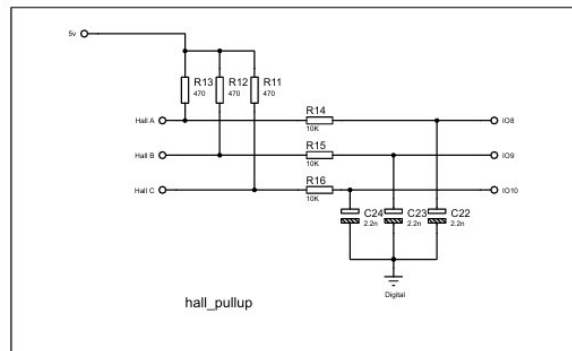
DC Stepdown



MCU



interface



hall_pullup

Lampiran 1.3 Kode Program

```
#include <avr/interrupt.h>
```

```

byte motor_speed, BLDC_step;
float count;
float time;
double rpm;
volatile uint32_t timestamp_prev = 0;
volatile uint32_t timestamp_curr = 0;
volatile uint32_t time_diff = 0;
int hallCount;
int comutation;

double derivative;
double input;
double output;
double lastError;
double integral;
double Kp = 1.0;
double Ki = 0.001;
double Kd = 0.01;
double error;

const int ADC_BASELINE = 50;

bool pin2State;
bool pin7State;
bool pin8State;
uint8_t step = 0;

void setup() {
  DDRD |= (1 << PD3); // Set PD3 (pin 3) as output
  DDRD |= (1 << PD5); // Set PD5 (pin 5) as output
  DDRD |= (1 << PD6); // Set PD6 (pin 6) as output

  // Configure pins 9, 10, and 11 on PORTB as outputs
  DDRB |= (1 << PB1); // Set PB1 (pin 9) as output
  DDRB |= (1 << PB2); // Set PB2 (pin 10) as output
  DDRB |= (1 << PB3); // Set PB3 (pin 11) as output

  DDRD &= ~(1 << PD2); // Set PD2 (pin 2) as input
  DDRD &= ~(1 << PD7); // Set PD7 (pin 7) as input
  DDRB &= ~(1 << PB0); // Set PB0 (pin 8) as input

  // Initialize all outputs to LOW
  PORTD &= ~(1 << PD3); // Clear PD3 (pin 3)
  PORTD &= ~(1 << PD5); // Clear PD5 (pin 5)
  PORTD &= ~(1 << PD6); // Clear PD6 (pin 6)
  PORTB &= ~(1 << PB1); // Clear PB1 (pin 9)
  PORTB &= ~(1 << PB2); // Clear PB2 (pin 10)

```

```

PORTB &= ~(1 << PB3); // Clear PB3 (pin 11)

// Timer 0 configuration for pin 5 (OC0B)
TCCR0A |= (1 << WGM00) | (1 << WGM01); // Fast PWM mode
TCCR0A |= (1 << COM0B1); // Non-inverting mode
TCCR0B |= (1 << CS00); // No prescaler

// Timer 1 configuration for pin 9 (OC1A)
TCCR1A |= (1 << WGM10) | (1 << WGM12); // Fast PWM 8-bit mode
TCCR1A |= (1 << COM1A1); // Non-inverting mode
TCCR1B |= (1 << CS10); // No prescaler

// Timer 2 configuration for pin 11 (OC2A)
TCCR2A |= (1 << WGM20) | (1 << WGM21); // Fast PWM mode
TCCR2A |= (1 << COM2A1); // Non-inverting mode
TCCR2B |= (1 << CS20); // No prescaler

EIMSK |= (1 << INT0); // Enable INT0
EICRA |= (1 << ISC00); // Trigger INT0 on any logical change

PCICR |= (1 << PCIE0) | (1 << PCIE2); // Enable pin change
interrupt for PCINT0..7 (port B) and PCINT16..23 (port D)
PCMSK0 |= (1 << PCINT0); // Enable pin change
interrupt for PB0 (pin 8)
PCMSK2 |= (1 << PCINT23); // Enable pin change
interrupt for PD7 (pin 7)

// ADC module configuration
ADMUX = 0x60; // Configure ADC module and select channel 0
ADCSRA = 0x84; // Enable ADC module with 16 division factor
(ADC clock = 1MHz)
enablePWMPin(5);
enablePWMPin(9);
enablePWMPin(11);
// BLDC motor first move
sei();
read_BLDC_step(); // Read hall effect sensors status (PINB:
read from PORTB which is arduino pins 8..13)
Serial.begin(9600);
BLDC_move();
// Move the BLDC motor (first move)
}

void read_BLDC_step() {
  step = ((PIND & (1 << PD2)) >> PD2) << 0 // Get the state
of pin 2 and put it in bit 0

```

```

        | ((PIND & (1 << PD7)) >> PD7) << 1 // Get the state
of pin 7 and put it in bit 1
        | ((PINB & (1 << PB0)) >> PB0) << 2;

    pin2State = ((PIND & (1 << PD2)) >> PD2);
    pin7State = ((PIND & (1 << PD7)) >> PD7);
    pin8State = ((PINB & (1 << PB0)) >> PB0);
}

ISR(INT0_vect) {
    timestamp_curr = micros();
    time_diff = timestamp_curr - timestamp_prev;
    timestamp_prev = timestamp_curr;
    rpm = (60000000 / (time_diff * 26));
    read_BLDC_step();
    BLDC_move();
    // Handle interrupt for pin 2 (PD2)
}

ISR(PCINT0_vect) {
    timestamp_curr = micros();
    read_BLDC_step();
    BLDC_move();
    // Handle pin change interrupt for pin 7 (PD7)
}

ISR(PCINT2_vect) {
    timestamp_curr = micros();
    read_BLDC_step();
    BLDC_move();
    // Handle pin change interrupt for pin 8 (PB0)
}

void timing_read() {
    // Print the state of each pin to the Serial Monitor
    Serial.print(" | adc : ");
    Serial.print(motor_speed);
    Serial.print(" | pid_out: ");
    Serial.print(pid());
    //Serial.print(" | hall: ");
    //Serial.print(pin8State);
    // Serial.print(pin7State);
    // Serial.print(pin2State);
    //Serial.print(" | step : ");
    //Serial.print(step);
    // Serial.print(" | comu : ");
    // Serial.print(comutation);
}

```

```

Serial.print(" | rpm : ");
Serial.print(rpm);
Serial.println();
}

void BLDC_move() { // BLDC motor move function
according to hall effect sensors status // Read and save hall
effect sensors status (PINB: read from PORTB which is Arduino
pins 8..13)
int adcValue = ADCH - ADC_BASELINE; // Read ADC high byte and
subtract baseline
if (adcValue < 0) {
adcValue = 0; // Ensure the value doesn't go below zero
}

motor_speed = map(adcValue, 0, 255 - ADC_BASELINE, 0, 250);

if (motor_speed < 5) {
step = 0;
}

switch (step) {
case 0:
comutation = 0;
disablePWMPin(5);
disablePWMPin(9);
disablePWMPin(11);
PORTD &= ~(1 << PD5); //L1 Off
PORTB &= ~(1 << PB1); //L2 off
PORTB &= ~(1 << PB3); //L3 off
break;
case 7:
comutation = 0;
disablePWMPin(5);
disablePWMPin(9);
disablePWMPin(11);
break;
case 3: // hall 011 comutation 1
disablePWMPin(9);
TCCR0A |= (1 << COM0B1);
disablePWMPin(11);

PORTD |= (1 << PD3); // Set PD3 on (pin 3 H1) (phase U
+)
PORTD &= ~(1 << PD6); // set PD6 off (pin 6 H2) (phase V
-)
}
}

```

```

    PORTB |= (1 << PB1);    //L2 on
    PORTB &= ~(1 << PB3);  //L3 off
    OCR0B = motor_speed;   //enable pwm on PD5 (pin 5) as L1
pwm

    comutation = 1;
    break;
case 1: //hall 001 comutation 2
    disablePWMonPin(11);
    enablePWMonPin(5);
    disablePWMonPin(9);

    PORTD |= (1 << PD3);    // Set PD3 on (pin 3 H1) (phase U
+)
    PORTB &= ~(1 << PB2);  // Set PB2 off (pin 10 H3) (phase W
-)

    PORTB |= (1 << PB3);    //L3 on
    PORTB &= ~(1 << PB1);  //L2 off
    OCR0B = motor_speed;   //enable pwm on PD5 (pin 5) as L1
pwm

    comutation = 2;
    break;
case 5: //hall 101 comutation 3
    enablePWMonPin(9);
    disablePWMonPin(11);
    disablePWMonPin(5);

    PORTD |= (1 << PD6);    // Set PD5 on (pin 6 H2) (phase V
+)
    PORTB &= ~(1 << PB2);  // Set PB2 off (pin 10 H3) (phase W
-)

    PORTB |= (1 << PB3);    //L3 On
    PORTD &= ~(1 << PD5);  //L1 Off
    OCR1A = motor_speed;   // enable PWM on PB1 (pin 9) as L2
pwm

    comutation = 3;
    break;
case 4: //hall 100 comutation 4
    disablePWMonPin(5);
    enablePWMonPin(9);
    disablePWMonPin(11);

```

```

-   PORTD &= ~(1 << PD3); // Set PD3 off (pin 3 H1) (phase U
+)
    PORTD |= (1 << PD6); // Set PD6 on (pin 6 H2) (phase V

    PORTD |= (1 << PD5); //L1 ON
    PORTB &= ~(1 << PB3); //L3 off
    OCR1A = motor_speed; // enable PWM on PB1 (pin 9) as L2
pwm

    comutation = 4;
    break;
case 6: //hall 110 comutation 5
    disablePWMonPin(5);
    enablePWMonPin(11);
    disablePWMonPin(9);

-   PORTD &= ~(1 << PD3); // Set PD3 off (pin 3 H1) (phase U
+)
    PORTB |= (1 << PB2); // Set PB2 on (pin 10 H3) (phase W

    PORTD |= (1 << PD5); //L1 ON
    PORTB &= ~(1 << PB1); //L2 off
    OCR2A = motor_speed; //enable pwm on PB3 (pin 11) as L3
pwm

    comutation = 5;
    break;
case 2: //hall 010 comutation 6
    disablePWMonPin(5);
    enablePWMonPin(11);
    disablePWMonPin(9);

-   PORTD &= ~(1 << PD6); // Set PD6 off (pin 6 H2) (phase V
+)
    PORTB |= (1 << PB2); // Set PB2 on (pin 10 H3) (phase W

    PORTB |= (1 << PB1); //L2 On
    PORTD &= ~(1 << PD5); //L1 Off
    OCR2A = motor_speed; //enable pwm on PB3 (pin 11) as L3
pwm

    comutation = 6;
    break;
}

```

```

}

void disablePWMPin(int pin) {
  switch (pin) {
    case 5: // PD5, Timer 0, OC0B
      TCCR0A &= ~(1 << COM0B1); // Clear the COM0B1 bit to
disconnect PD5 (pin 5) from Timer 0
      break;
    case 9: // PB1, Timer 1, OC1A
      TCCR1A &= ~(1 << COM1A1); // Clear the COM1A1 bit to
disconnect PB1 (pin 9) from Timer 1
      break;
    case 11: // PB3, Timer 2, OC2A
      TCCR2A &= ~(1 << COM2A1); // Clear the COM2A1 bit to
disconnect PB3 (pin 11) from Timer 2
      break;
    default:
      // Do nothing if an unsupported pin is specified
      break;
  }
}

void enablePWMPin(int pin) {
  switch (pin) {
    case 5: // PD5, Timer 0, OC0B
      TCCR0A |= (1 << COM0B1); // Set the COM0B1 bit to connect
PD5 (pin 5) to Timer 0
      break;
    case 9: // PB1, Timer 1, OC1A
      TCCR1A |= (1 << COM1A1); // Set the COM1A1 bit to connect
PB1 (pin 9) to Timer 1
      break;
    case 11: // PB3, Timer 2, OC2A
      TCCR2A |= (1 << COM2A1); // Set the COM2A1 bit to connect
PB3 (pin 11) to Timer 2
      break;
    default:
      // Do nothing if an unsupported pin is specified
      break;
  }
}

double pid(){
  input = rpm;
  error = map(motor_speed, 0, 250, 0, 470) - input;
  integral += error;
  derivative = error - lastError;
}

```

```

    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;
    output = constrain(output, 0, 250);

    lastError = error;
    return output;
}

void loop() {
    sei();
    ADCSRA |= 1 << ADSC; // Start conversion
    // Read ADC data (8 bits)

    // Software PWM
    //test();
    timing_read();
    read_BLDC_step();
    timestamp_curr = micros(); //
    BLDC_move();
}

```

Lampiran 1.4 Foto Produk Minicont-EV

