

LAPORAN TUGAS AKHIR / *CAPSTONE DESIGN*

IMCO: Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor BLDC untuk Kendaraan Motor Listrik



Penyusun:

Muhammad Rais (17524019)

Repka Wisthi Drestanto (18524072)

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta

2022

HALAMAN PENGESAHAN

IMCO: Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor BLDC untuk Kendaraan Motor Listrik

Penyusun:

Muhammad Rais (17524019)


Repka Wisthi Drestanto (18524072)

Yogyakarta, 25 Juli 2022

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2


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


Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.

035240102

045240101

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**IMCO: Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor BLDC
untuk Kendaraan Motor Listrik**



Ketua Penguji
Anggota Penguji 1
Anggota Penguji 2

: Dwi Ana Ratna Wati, S.T., M.Eng.
: Husein Mubarak, S.T., M.Eng.
: Donny Suryawan, S.T., M.Eng.

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

Tanggal: 18 Agustus 2022
Ketua Program Studi Teknik Elektro



Anrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.
045240101

PERNYATAAN

Dengan ini kami menyatakan bahwa:

1. Tugas Akhir ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjaan 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, paten merupakan milik bersama antaraa 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, 18 Agustus 2022



Muhammad Rais (17524019)



Repka Wisthi Drestanto (18524072)

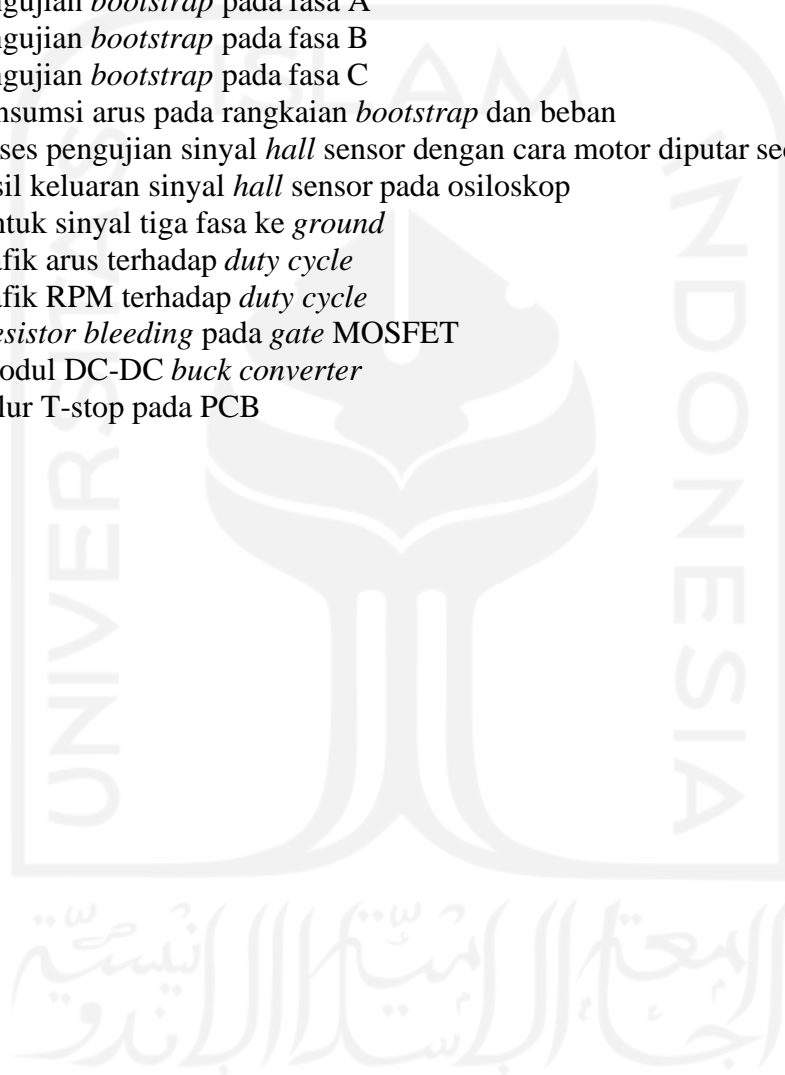


DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
RINGKASAN TUGAS AKHIR	1
BAB 1: Definisi Permasalahan	2
BAB 2: Observasi	4
BAB 3: Usulan Perancangan Sistem	9
3.1 Usulan Rancangan Sistem	9
3.2 Metode Uji Coba dan Pengujian Usulan Rancangan Sistem	21
BAB 4: Hasil Perancangan Sistem	24
4.1 Kesesuaian Usulan dan Hasil Perancangan Sistem	24
4.2 Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya	24
4.3 Analisis dan Pembahasan Kesesuaian antara Perencanaan dan Realisasi	27
BAB 5: Implementasi Sistem dan Analisis	30
5.1 Hasil dan Analisis Implementasi	30
5.1.1 Pengujian Tegangan Regulator	30
5.1.2 Pengujian <i>bootstrap</i> MOSFET <i>driver</i> Tiap Fasa	30
5.1.3 Pengujian Sinyal <i>Hall Sensor</i>	32
5.1.4 Pengujian Komutasi 6 Langkah	32
5.1.5 Pengujian Sinyal Fasa- <i>Ground</i> pada Motor Tanpa Beban	33
5.1.6 Pengujian Nilai RPM dan Arus pada Motor Tanpa Beban	35
5.2 Pengalaman Pengguna	37
5.3 Dampak Implementasi Sistem	37
5.3.1 Teknologi/Inovasi	37
5.3.2 Ekonomi	39
BAB 6: Kesimpulan dan Saran	40
6.1 Kesimpulan	40
6.2 Saran	40
LAMPIRAN – LAMPIRAN	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Metode <i>Design Thinking</i>	9
Gambar 3. 2 Skema diagram elektronis	12
Gambar 3. 3 Diagram <i>flowchart</i> sistem	13
Gambar 3. 4 Skematik Elektronis Usulan	17
Gambar 3. 5 Desain PCB rangkaian	18
Gambar 3. 6 Tampilan <i>interface</i> arduino IDE	20
Gambar 3. 7 Hasil desain <i>box</i> instrumen	21
Gambar 4. 1 Tampak luar produk IMCO	28
Gambar 4. 2 Tampak dalam produk IMCO	28
Gambar 5. 1 Pengujian <i>bootstrap</i> pada fasa A	31
Gambar 5. 2 Pengujian <i>bootstrap</i> pada fasa B	31
Gambar 5. 3 Pengujian <i>bootstrap</i> pada fasa C	31
Gambar 5. 4 Konsumsi arus pada rangkaian <i>bootstrap</i> dan beban	31
Gambar 5. 5 Proses pengujian sinyal <i>hall</i> sensor dengan cara motor diputar secara manual	32
Gambar 5. 6 Hasil keluaran sinyal <i>hall</i> sensor pada osiloskop	32
Gambar 5. 7 Bentuk sinyal tiga fasa ke <i>ground</i>	34
Gambar 5. 8 Grafik arus terhadap <i>duty cycle</i>	36
Gambar 5. 9 Grafik RPM terhadap <i>duty cycle</i>	36
Gambar 5. 10 <i>Resistor bleeding</i> pada <i>gate</i> MOSFET	38
Gambar 5. 11 Modul DC-DC <i>buck converter</i>	38
Gambar 5. 12 Jalur T-stop pada PCB	38



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kumpulan solusi yang identik dengan proyek tugas akhir	4
Tabel 2. 2 Hasil survei dengan pengguna kendaraan listrik	5
Tabel 2. 3 Spesifikasi alat	8
Tabel 3. 1 Daftar komponen untuk inventarisasi <i>Capstone Design</i>	18
Tabel 4. 1 Perbandingan usulan dan hasil perancangan sistem	24
Tabel 4. 2 Kesesuaian usulan dan realisasi <i>timeline</i> pengerjaan tugas akhir 2	25
Tabel 4. 3 Kesesuaian usulan dan realisasi RAB tugas akhir	25
Tabel 5. 1 Pengujian tegangan regulator	30
Tabel 5. 2 Pengujian komutasi 6 langkah	33
Tabel 5. 3 Pengujian arus dan RPM pada tegangan 45, 48, dan 51 V	35
Tabel 5. 4 Pengalaman pengguna	37



RINGKASAN TUGAS AKHIR

Krisis energi merupakan isu yang sedang terjadi saat ini, maka dari itu umat manusia terus mencari energi alternatif untuk menjaga ketersediaan energi di bumi. Hal tersebut mendorong perkembangan teknologi salah satunya teknologi kendaraan menggunakan energi listrik. Tanpa terkecuali di Indonesia pun sebagian masyarakat memilih untuk beralih ke kendaraan listrik karena kendaraan listrik memiliki beberapa keunggulan seperti lebih ramah lingkungan, lebih mudah perawatannya dibandingkan dengan kendaraan bahan bakar konvensional, serta biaya energi yang lebih murah.

Untuk mendukung transisi dari penggunaan kendaraan bahan bakar konvensional ke kendaraan listrik, maka Prodi Teknik Elektro pun melakukan pengembangan kendaraan listrik untuk lingkungan kampus UII. Salah satu komponen utama yang digunakan pada kendaraan listrik yaitu *controller* atau sistem pengendali yang berperan sebagai pengaturan motor mulai dari proses *starting*, proses selama motor berputar hingga proses pemberhentian motor baik dengan pengereman maupun tidak. Pengaturan saat motor dalam kondisi berputar dapat berupa pengaturan arah putaran maupun pengaturan kecepatan putaran. Maka dari itu terciptalah produk IMCO (*Intelligent Mobility Controller*) yang merupakan perangkat *controller* untuk mengatur kecepatan putar motor BLDC pada kendaraan listrik yang nantinya akan diaplikasikan untuk keperluan mobilitas di lingkungan kampus UII. IMCO sendiri memiliki spesifikasi tegangan 48 V dengan daya 1000 W dan arus maksimal 40 A. Spesifikasi tersebut disesuaikan dengan medan yang akan dilalui. Berdasarkan hasil pengujian, IMCO mampu mengatur kecepatan putar motor BLDC sesuai dengan *set point* yang diberikan oleh *throttle*.

Produk IMCO sudah melewati beberapa uji coba untuk memastikan bahwa sistem sudah berjalan dengan baik. Dan dari hasil uji coba yang dilakukan menunjukkan bahwa produk IMCO sudah dapat mengendalikan putaran motor BLDC sesuai dengan *set point* yang ditentukan oleh *throttle*. Namun produk IMCO belum melewati uji coba mengendalikan putaran motor BLDC dengan beban dikarenakan waktu pengerjaan yang terbatas.

BAB 1: Definisi Permasalahan

Keterbatasan energi merupakan isu yang sedang terjadi di seluruh dunia termasuk di Indonesia. Persediaan bahan bakar yang digunakan untuk kendaraan konvensional perlahan semakin menipis persediaannya, sehingga diperlukan alternatif energi lain sebagai penggantinya, salah satunya adalah energi listrik.[1]

Pengembangan teknologi kendaraan listrik di Indonesia masih tertinggal dibandingkan negara-negara lain, hal ini dapat dibuktikan dengan minimnya produk kendaraan listrik buatan Indonesia maupun komponen pendukung kendaraan listrik hasil produksi Indonesia yang dijual di pasaran. Hal ini menyebabkan Indonesia menjadi sasaran pasar yang empuk bagi produk-produk impor untuk menjual produk-produk mereka. Maka dari itu perlu dimulainya riset pengembangan teknologi kendaraan listrik untuk menciptakan sumber daya manusia yang ahli di bidang teknologi kendaraan listrik sehingga mampu menciptakan teknologi kendaraan listrik yang dapat bersaing dengan produk-produk impor baik dari segi teknologi maupun harga.

Kendaraan listrik memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kendaraan konvensional. [2] Selain itu, kendaraan listrik mudah untuk dioperasikan dan mudah dalam perawatannya karena komponen yang terdapat pada kendaraan listrik jauh lebih sedikit dibandingkan kendaraan konvensional serta kendaraan listrik terkenal sangat ramah lingkungan. Kendaraan listrik memiliki tiga komponen utama dalam sistem kelistrikannya yang terdiri dari baterai, sistem kendali, dan motor penggerak.

Baterai digunakan sebagai sumber arus untuk seluruh sistem kelistrikan serta sebagai tempat untuk menyimpan energi listrik pada saat terjadi proses pengisian. [3] Sistem kendali berperan sebagai pengaturan motor mulai dari proses *starting*, proses selama motor berputar hingga proses pemberhentian motor baik dengan pengereman maupun tidak. Pengaturan saat motor dalam kondisi berputar dapat berupa pengaturan arah putaran maupun pengaturan kecepatan putaran. [4] Sistem kendali motor adalah teknologi yang banyak digunakan untuk mengubah tegangan konstan dari catu daya listrik AC menjadi tegangan yang dapat divariasikan untuk mengontrol torsi motor dan kecepatan motor yang ideal untuk menggerakkan beban peralatan mekanis. [5] Untuk motor penggerak yang kami gunakan disini yaitu motor BLDC.

Motor BLDC dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan motor jenis lain, diantaranya adalah tidak menggunakan sikat (*brush*), efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan motor *brushed*, hampir tidak menimbulkan suara, tahan lama, dan juga memiliki satu ciri khas lain dimana terdapat *controller* yang bertugas untuk mendistribusi arus dan tegangan, sesuai dengan kebutuhan untuk satu kali putaran-nya. [6] Atas dasar argumen diatas, maka tugas akhir ini akan merancang sebuah sistem kendali kecepatan putar motor BLDC pada kendaraan motor listrik yang

nantinya akan diaplikasikan pada kendaraan motor listrik yang dirancang untuk mobilitas di lingkungan kampus Universitas Islam Indonesia.

Berdasarkan paparan diatas, dengan peralihan kendaran konvensional ke kendaraan listrik maka dapat mengurangi kerusakan iklim dan krisis energi. Serta dengan dimulainya riset dan pengembangan teknologi pada kendaraan listrik, maka akan tercipta SDM yang mampu menciptakan produk teknologi kendaraan listrik yang dapat bersaing dengan produk teknologi impor. Salah satu teknologi yang digunakan pada kendaraan listrik yaitu motor penggerak. Pada kendaraan listrik salah satu motor penggeraknya adalah motor BLDC. Motor BLDC merupakan motor yang paling efisien untuk kendaraan listrik. Namun motor BLDC membutuhkan *controller* khusus, maka dari itu kami memutuskan untuk merancang produk IMCO (*Intelligent Mobility Controller*).

Sebagai langkah awal dalam perancangan, terdapat batasan realistis *engineering* yang penulis gunakan. Diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Controller* kendaraan motor listrik yang dirancang berbentuk *prototype*.
2. Kecepatan maksimal motor listrik 50 km/jam. [7]
3. *Controller* yang dirancang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar motor BLDC.
4. *Controller* yang dirancang memiliki sistem *emergency* berupa pemutus arus otomatis ketika terdapat arus yang berlebih yang dideteksi oleh *shunt* resistor.
5. Daya rata-rata yang dihasilkan produk IMCO adalah sebesar 1000 W dengan tegangan 48 V.

Batasan masalah pada perancangan ini adalah perancangan perangkat ini difokuskan pada sistem kendali putar motor BLDC dengan sensor *hall effect* pada kendaraan listrik dengan metode *six step commutation* berbasis arduino nano, dimana perangkat yang dirancang berfungsi untuk mengubah sinyal DC pada baterai menjadi sinyal AC tiga fasa yang telah dimodifikasi sesuai *set point* kecepatan melalui *throttle* yang akan dihubungkan pada motor BLDC pada kendaraan listrik.

Adapun tujuan kami membuat *controller* BLDC ini yaitu supaya alat kami mampu untuk mengendalikan kecepatan putar motor listrik yang menggunakan motor BLDC 1000 Watt serta mempertimbangkan aspek teknologi, aspek ekonomi, dan aspek lingkungan sehingga dapat bermanfaat pada ekosistem kendaraan listrik di lingkungan kampus Universitas Islam Indonesia.

BAB 2: Observasi

Proses observasi yang kami lakukan bertujuan untuk memberikan ide serta inovasi supaya rancangan sistem yang kami usulkan sesuai dengan batasan realistis yang ditentukan, sehingga dapat memenuhi kebutuhan awal pada tahap *prototyping*. Untuk mencapai tahap tersebut, pada tahapan observasi kami mengumpulkan informasi-informasi tentang kebutuhan sistem yang akan kami rancang. Hasil dari observasi yang kami lakukan yaitu informasi yang dikumpulkan dengan cara melakukan studi literatur dan juga melakukan diskusi dengan praktisi sistem kendali sehingga didapatkan solusi untuk permasalahan kami, serta spesifikasi sistem yang akan kami gunakan. Tabel 2.1. kan menampilkan beberapa sumber informasi dan solusi yang kami dapat dari hasil studi literatur.

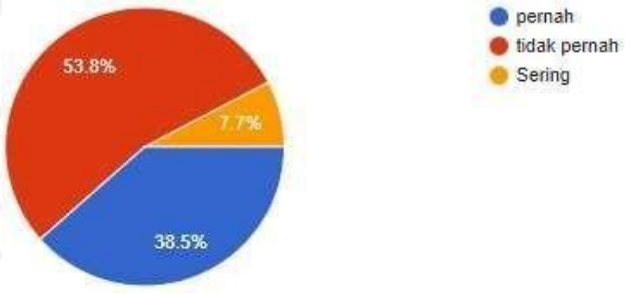
Tabel 2. 1 Kumpulan solusi yang identik dengan proyek tugas akhir

Penulis	Usulan solusi	Hasil / Evaluasi
Danu Akbar, Slamet Riyadi (2018) [8]	Pengaturan kecepatan pada motor BLDC menggunakan sinyal PWM	Perancangan dan penelitian yang dilakukan menghasilkan sinyal yang baik. dimana kecepatan motor berhasil dilakukan dengan mengubah <i>duty cycle</i> pada sinyal PWM. tegangan dan arus yang mengalir pada motor berubah sesuai dengan nilai <i>duty cycle</i> yang dimasukan. Namun hasil pengujian tidak menampilkan bentuk sinyal tiap fasa ke <i>ground</i> , sehingga tidak diketahui konfigurasi <i>switching</i> sudah berjalan dengan sempurna atau belum.
Nandha Redha Arsyah, Heri Suryoatmojo, Sjamsjul Anam (2016) [9]	Kontrol kecepatan motor BLDC berbasis <i>Power Factor Correction</i> (PFC) menggunakan <i>Single ended Primary Inductance Converter</i> (SEPIC)	Hasil sudah dijelaskan dengan baik tetapi hanya berbentuk simulasi. Dengan menggunakan konverter SEPIC nilai faktor daya meningkat jadi 0.999. Penggunaan metode ini lebih banyak digunakan untuk motor BLDC yang digunakan pada peralatan rumah tangga bukan kendaraan listrik.
Oleg Basovych (2018) [10]	Pengendali motor BLDC menggunakan kontroler GreenPAK	Hasil dan rancangan sudah dijelaskan dengan baik hanya saja <i>controller</i> yang digunakan yaitu GreenPAK.

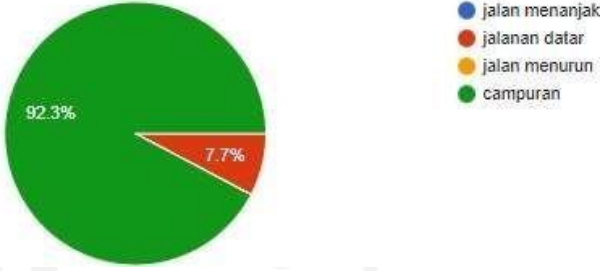
Berdasarkan hasil studi literatur dan diskusi, maka kami memutuskan untuk menggunakan arduino nano sebagai *microcontroller* pada *controller* motor BLDC. Alasan kami memilih menggunakan arduino nano yaitu karena penggunaannya yang relative mudah serta memiliki fitur yang memadai. Untuk *driver* MOSFET sendiri kami memiliki dua opsi, yang pertama yaitu menggunakan IC IR2101 dan opsi kedua yaitu menggunakan transistor BJT totempole. Jika menggunakan *driver* opsi pertama tidak berhasil maka kemudian kami menggunakan *driver* opsi yang kedua.

Kemudian kami juga melakukan survei kepada para pengguna kendaraan listrik yang terdapat pada forum komunitas pengguna sepeda listrik pada platform *facebook*. Proses survei dilakukan dengan membuat beberapa pertanyaan dengan format pilihan ganda dan isian tertulis melalui *google form*. Proses selanjutnya adalah pencarian komunitas yang bergerak di bidang kendaraan listrik untuk target responden dari survei yang dibuat. Setelah menemukan komunitas yang tepat, proses penyebaran survei dilakukan dengan mengirim pesan *broadcast* yang berisi informasi tema, tujuan, dan syarat responden pengisi survei serta hadiah berupa saldo uang elektronik sebesar Rp. 20.000,00 untuk tiga orang responden yang dipilih secara acak dengan tujuan menarik perhatian anggota komunitas untuk mengisi survei yang dibagikan. Setelah mendapatkan data hasil survei, data tersebut dianalisis untuk dijadikan salah satu penentuan spesifikasi sistem. Adapun data hasil survei yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Hasil survei dengan pengguna kendaraan listrik

Pertanyaan	Jawaban/tanggapan
Apakah anda pernah mengalami baterai sepeda listrik anda habis di tengah perjalanan?	

Pertanyaan	Jawaban/tanggapan
<p>Apa saja kendala yang pernah dialami saat mengendarai sepeda listrik?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lebih berat saat harus naik tangga 2. Sejauh ini belum ada 3. Tidak ada, karena masalah yang dulu ditemukan sekarang sudah ada solusinya 4. Baut kendor 5. Butuh dana besar setiap ganti baterai 6. Tidak semua bengkel sepeda bisa menerima servis, membuat saya belajar 7. Trobel selama ini bisa saya atasi sendiri 8. Was was kalo hujan 9. Baterai hampir meledak, pasca penggantian BMS dan penggantian kabel yang ternyata kualitasnya jelek 10. Saat hujan gas tidak mau berjalan. Mau tidak mau harus berteduh dahulu
<p>Apa kekurangan sepeda listrik yang anda kendarai?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tempat pemasangan baterai tidak ada yg pas sehingga hanya pakai ban dalam saja 2. Untuk jarak tempuh masih belum jauh dan beban frame sepedah masih terlalu berat 3. Tidak ada 4. Susah masuk mobil 5. Jarak tempuh kurang dari 60 km untuk beban maksimal 100 kg. 6. Tidak tahan hujan tapi sudah saya atasi dengan cover cukup untuk melewati hujan ringan sampai sedang 7. Speed dan jarak tempuh kurang 8. Konstruksi <i>box</i> baterai Belum anti air 9. Top speed dan berkendara saat hujan
<p>Fitur apa saja yang terdapat pada sepeda listrik anda yang terkait dengan performa sepeda listrik anda? (contoh: mode berkendara, fast charging, dll)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ada <i>throttle</i> dan juga pedal assist, juga bisa membatasi watt maksimal, ada juga pengukur jarak dan waktu 2. Standar, seperti layaknya sepedah listrik pada umumnya 3. Dual baterai sehingga bisa diisi dengan 2 charger dan otomatis menghemat banyak waktu pengisian 4. Standar 5. Baterai swap 6. Tidak ada fitur istimewa tapi tetap menjadi kendaraan yang istimewa 7. Fitur standar uwinfly baby 2 8. Tidak ada fitur yang menarik, karena kebetulan unit saya produk jadul 9. Mode berkendara, baterai lifepo4, charger 5A sudah cukup, dan alarm

Pertanyaan	Jawaban/tanggapan										
<p>Apa keinginan anda terkait spesifikasi untuk pengembangan sepeda listrik kedepannya ?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ingin lebih banyak jenis recumbent dan velomobile 2. Memiliki umur battery yang lebih panjang performanya dan lebih murah harganya 2. Lebih kepada infrastruktur penukaran baterai yang merata di mana-mana. Ini sudah sedang diusahakan oleh pemerintah 3. Jarak tempuh lebih jauh 4. Baterai swap dengan harga dibawah bbm 5. Harga baterai menjadi lebih murah dan umur baterai yang panjang 6. Harga batre murah dan fast charging 7. Motor yang ringan dan performa bagus dalam melibas tanjakan, <i>fast charging/swap</i> baterai mudah, kode diagnosa kerusakan elektronik yang ditampilkan di dashboard jadi lebih mudah analisa kerusakan 8. Top speed 70-80 cukup untuk pinggiran Jakarta - bekasi 9. Dinamo dan perkabelan yg sudah waterproof seperti motor bensin 										
<p>Medan seperti apa yang biasa anda lalui saat mengendarai sepeda listrik?</p>	 <table border="1"> <caption>Data from Pie Chart</caption> <thead> <tr> <th>Terrain Type</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>campuran</td> <td>92.3%</td> </tr> <tr> <td>jalan menanjak</td> <td>7.7%</td> </tr> <tr> <td>jalan datar</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>jalan menurun</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	Terrain Type	Percentage	campuran	92.3%	jalan menanjak	7.7%	jalan datar	0%	jalan menurun	0%
Terrain Type	Percentage										
campuran	92.3%										
jalan menanjak	7.7%										
jalan datar	0%										
jalan menurun	0%										

Tabel 2. 2 merupakan data hasil survei yang telah dilakukan kepada para pengguna sepeda listrik yang terdapat pada forum komunitas pengguna sepeda listrik di platform *facebook*. Berdasarkan hasil survei diatas salah satu masalah yang bisa kami atasi yaitu permasalahan jarak tempuh, dengan cara menambahkan fitur rem regeneratif sehingga mampu menambah jarak tempuh kendaraan listrik tersebut. Tetapi karena terkendala waktu dan proses yang cukup rumit kami memutuskan untuk tidak jadi menambahkan fitur rem regeneratif pada alat kami. Maka dari itu alat kami masih belum bisa menjawab permasalahan yang tertera pada survei diatas.

Berdasarkan hasil survei yang telah dilakukan, maka ditentukan spesifikasi alat yang akan digunakan sebagai solusi dari permasalahan yang ada. Tabel spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Spesifikasi alat

Jenis motor yang di kendalikan	BLDC motor
Tegangan	48 V
Daya	1000 W
Input <i>set point</i>	<i>Handle gas throttle</i>
Arus <i>max</i>	40 A

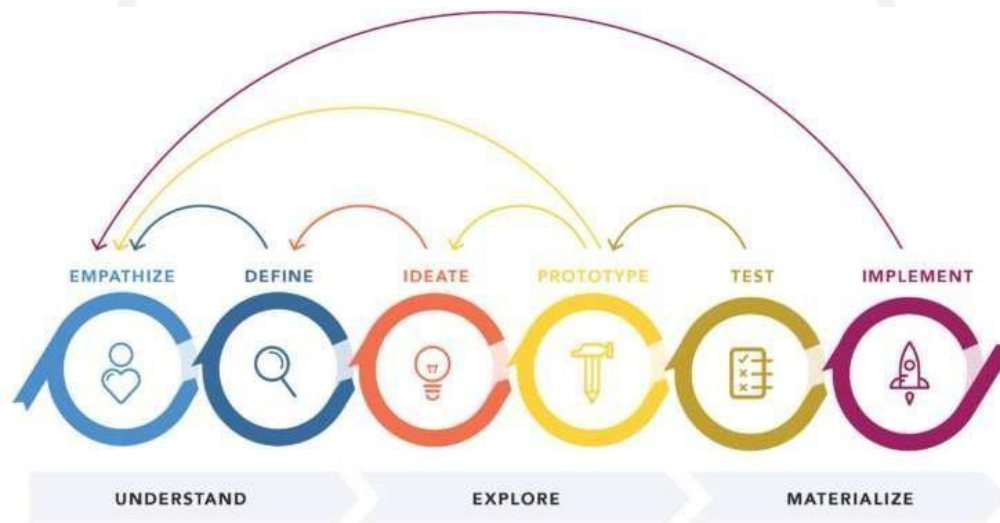
Dalam melakukan perancangan, terdapat standar keteknikan yang dijadikan acuan perancangan untuk mendukung performa serta keamanan dari produk yang dirancang. Standar yang digunakan dalam perancangan ini diantaranya adalah:

1. *Controller* berfungsi untuk meregulasi kecepatan dan torsi BLDC motor, mengaktifkan dan mematikan kendaraan, dan menghentikan system bila terjadi kesalahan (jika terdeteksi arus berlebih maka system akan nonaktif) sesuai dengan ISO/TS4210-10:2020 poin 3.12 “*motor controller*”.
2. Sistem kendali yang dirancang memiliki tingkat kedap air IPX4 atau tahan siraman air dalam segala arah sesuai dengan standar ISO/TS 4210-10:2020 poin 6.7 “*protection against ingress of water*”.

BAB 3: Usulan Perancangan Sistem

3.1 Usulan Rancangan Sistem

Dalam melakukan kegiatan perancangan, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan untuk menemukan solusi dari permasalahan yang ada. Dalam hal ini, metode yang digunakan pada tahapan-tahapan tersebut adalah metode *Design Thinking*. Metode ini merupakan metode yang menggabungkan banyak ide dari berbagai macam disiplin ilmu untuk memperoleh suatu solusi serta metode yang efektif untuk memecahkan suatu permasalahan yang kompleks. *Design Thinking* terdiri dari 5 tahapan sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Metode *Design Thinking*

1. *Empathize* (Empati)

Tahap *empathize* (empati) merupakan upaya untuk memahami permasalahan yang terjadi dengan cara mencari informasi sebanyak mungkin dari berbagai macam sumber informasi seperti jurnal, wawancara, kuesioner, serta observasi secara langsung. Dalam perancangan produk IMCO, upaya-upaya pencarian informasi yang telah dilakukan diantaranya adalah studi literatur melalui jurnal yang membahas tentang sistem kendali motor BLDC dan rem regeneratif, membuat kuesioner yang dibagikan kepada pengguna kendaraan listrik, serta berdialog secara langsung dengan pegiat kendaraan listrik dan praktisi di bidang *power electronic*. Kemudian informasi dari upaya-upaya tersebut akan diolah dan dijadikan bahan pertimbangan untuk tahap selanjutnya.

2. *Define* (Penetapan)

Define (penetapan) merupakan tahapan untuk menganalisa serta memahami hasil dari pencarian informasi yang dilakukan pada tahap *empathize*. Informasi-informasi yang didapatkan dari jurnal, kuisisioner, dan hasil dialog dengan praktisi kendaraan listrik dan *power electronic* akan

dijadikan acuan spesifikasi dari produk yang akan dirancang. Adapun hasil dari tahap *define* pada perancangan ini adalah:

1. Penentuan kapasitas daya sistem kendali sebesar 1000 W sesuai dengan jenis kendaraan beserta medan yang akan dilalui.
2. Penentuan kecepatan maksimal kendaraan dengan kecepatan maksimal 50 Km/H sesuai dengan peraturan Kementerian Perhubungan yang ada.
3. Penggunaan MOSFET dengan spesifikasi arus yang lebih tinggi dibanding spesifikasi produk yang dirancang dengan tujuan meminimalisir kerusakan bila terjadi kesalahan pensaklaran sinyal.

3. *Ideate* (Ide)

Tahap *Ideate* (ide) merupakan tahap transisi antara rumusan masalah menuju ke penyelesaian masalah. Tahap ini akan berfokus untuk menghasilkan ide serta inovasi yang dijadikan landasan untuk membuat prototipe yang akan dibuat. Adapun hasil dari tahap *ideate* ini adalah terbentuknya mekanisme sistem kerja alat yang akan dirancang. Berikut adalah mekanisme kerja alat yang akan dibuat:

1. Pengguna memutar *handle* gas untuk memberi sinyal analog yang akan diterima *microcontroller*.
2. *Microcontroller* akan mengirim sinyal PWM dengan nilai *duty cycle* sesuai nilai analog yang dimasukkan oleh *throttle* ke rangkaian *inverter* tiga fasa melalui rangkaian *gate driver* sesuai dengan komutasi yang telah ditentukan dan diteruskan ke motor BLDC.
3. Motor BLDC akan berputar sesuai nilai *duty cycle* pada sinyal PWM yang diterima dan memberikan sinyal *feedback* berupa nilai digital yang dihasilkan *hall effect sensor* kepada *microcontroller* sebagai sinkronisasi pensaklaran.

4. *Prototype* (Prototipe)

Tahap *prototype* adalah tahap membuat rancangan awal suatu produk yang akan dibuat sesuai dengan desain sistem yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, *prototype* akan dibuat hingga dapat dilakukan pengujian untuk memperoleh *feedback* berupa informasi bahwa produk sudah sesuai dengan desain atau belum.

5. *Test* (Uji Coba)

Tahap *test* merupakan tahap dimana dilakukan pengujian pada *prototype* yang telah dibuat untuk mendapatkan *feedback* berupa kendala maupun ketidaksesuaian hasil kerja produk dengan spesifikasi yang akan dijadikan sebagai bahan evaluasi serta penilaian dari produk yang dirancang.

Jika hasil kerja dari produk belum sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan, maka akan dilakukan evaluasi serta perbaikan dari tahapan-tahapan sebelumnya.

6. *Implement* (Implementasi)

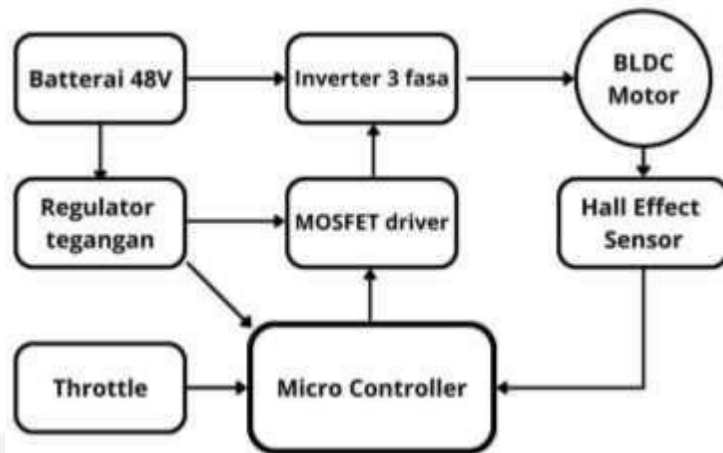
Tahap *Implement* merupakan tahap terakhir dari proses *design thinking*. Pada tahap ini, produk yang telah dirancang akan diimplementasikan langsung sesuai fungsi yang telah ditetapkan sebagai pemecah suatu masalah. Dalam hal ini, produk yang akan dirancang akan diimplementasikan pada kendaraan roda dua untuk lingkungan kampus yang telah dirancang oleh kelompok *Capstone Design* Teknik Elektro UII angkatan 2018 yang berjudul “Rancang Bangun Kendaraan Listrik di Wilayah Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia”.

Setelah melakukan tahapan-tahapan dalam *Design Thinking*, maka dibentuklah usulan spesifikasi teknis yang akan dijadikan landasan dalam penentuan metode serta komponen-komponen yang akan dipakai. Berikut adalah spesifikasi teknis dari produk IMCO:

1. Rentang tegangan = 48 - 60 V
2. Arus maksimal = 40 A
3. Rentang kerja *duty cycle* saat motor berjalan = 1 - 100 %
4. Frekuensi PWM = 30 kHz
5. Sensor = *Hall Sensor effect*
6. Bentuk sinyal *output* = *Trapezoidal Waveform*
7. Pengendali = *Throttle handle gas*

Penentuan dari spesifikasi teknis tersebut ditentukan berdasarkan karakteristik dari kendaraan yang akan dikendalikan, ketersediaan komponen yang akan digunakan, serta proses *reverse engineering* dari produk yang serupa.

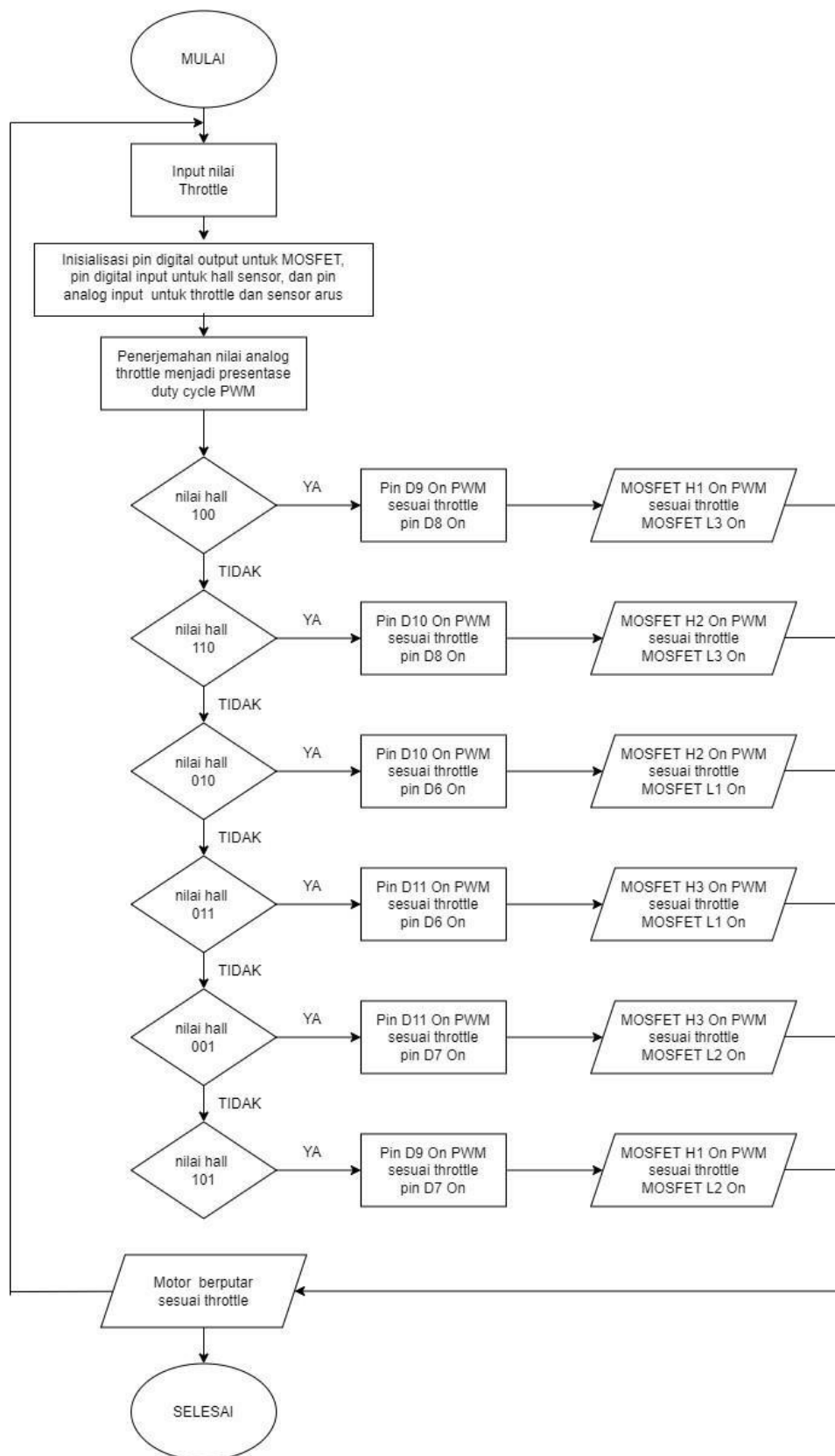
Tahap selanjutnya setelah penentuan spesifikasi teknis adalah penentuan skematik diagram elektronis yang akan digunakan pada produk yang dirancang. Skema diagram elektronis dapat berfungsi sebagai penentu dari metode pemrosesan kerja yang akan digunakan maupun sebagai acuan desain elektronis dan penentuan komponen yang digunakan. Berikut adalah skema diagram elektronis yang digunakan:



Gambar 3. 2 Skema diagram elektronis

Dapat dilihat pada skematik diagram Gambar 3. 2 sumber tegangan utama yang digunakan pada produk IMCO adalah baterai lithium-ion dengan tegangan 48 V yang akan menyuplai *inverter* secara langsung serta MOSFET *driver* dan *microcontroller* melalui rangkaian regulator tegangan. Kemudian perangkat *throttle* digunakan sebagai pengatur kecepatan putar motor BLDC melalui sinyal analog yang diterjemahkan menjadi sinyal PWM oleh *microcontroller*. Sinyal PWM tersebut akan diteruskan ke rangkaian *inverter* tiga fasa melalui rangkaian MOSFET *driver* untuk mengubah sinyal DC yang berasal dari baterai menjadi sinyal AC trapezoidal tiga fasa sebagai daya *input* untuk memutar motor BLDC. Hall sensor pada motor BLDC berperan sebagai pembaca posisi dari rotor yang akan dijadikan sebagai data sinkronisasi antara posisi rotor dengan sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian *inverter*.

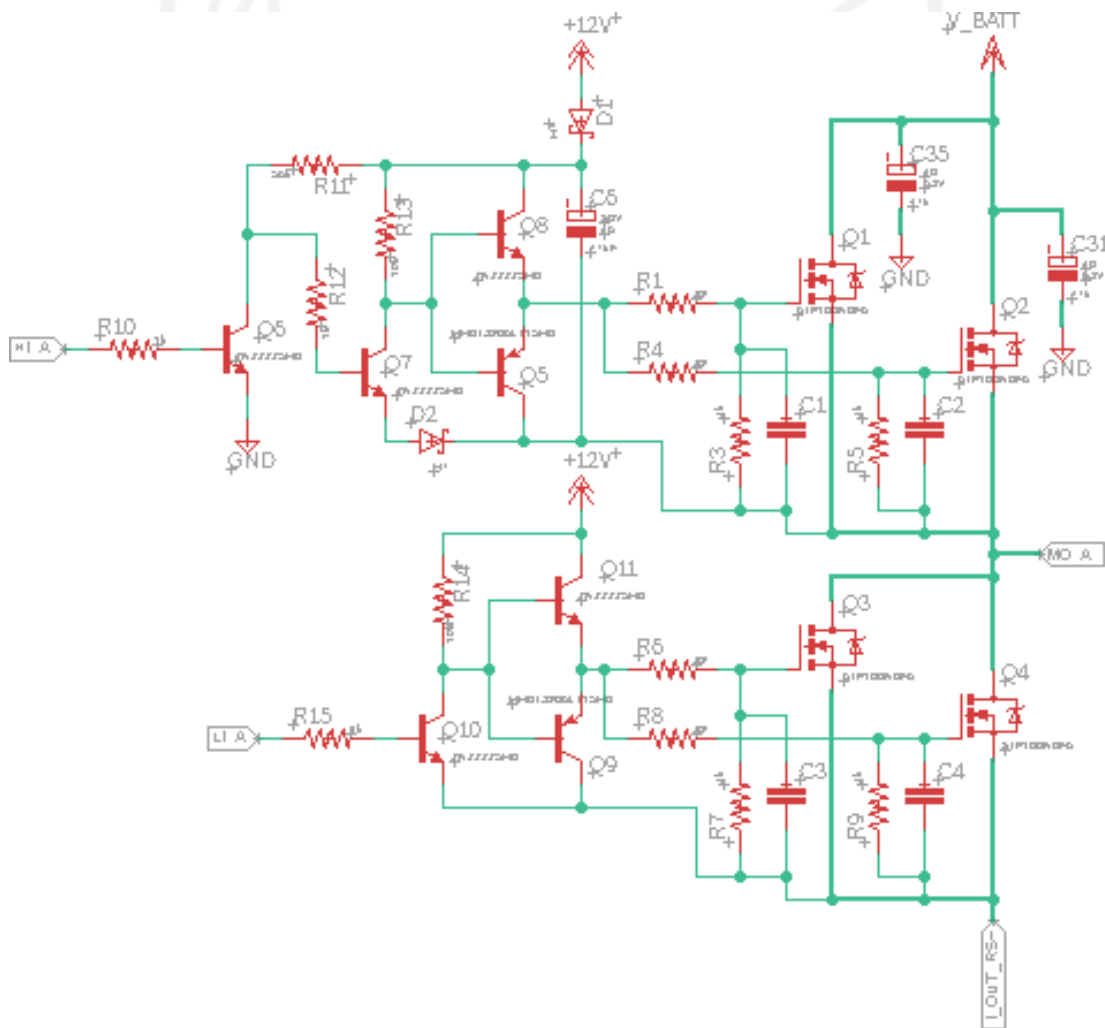
Setelah menentukan skema diagram elektronik dari produk yang akan dirancang, maka langkah selanjutnya adalah membuat diagram *flowchart* dari metode serta sistem yang akan digunakan pada produk. *Flowchart* yang dirancang berisikan sistem kerja dari produk mulai dari pembacaan *input throttle* hingga skema penghasilan sinyal *output* untuk mengaktifkan motor BLDC yang dikendalikan. *Flowchart* akan dijadikan acuan dalam pembuatan program dari sistem kendali yang dirancang. Berikut adalah diagram *flowchart* yang telah dibuat:



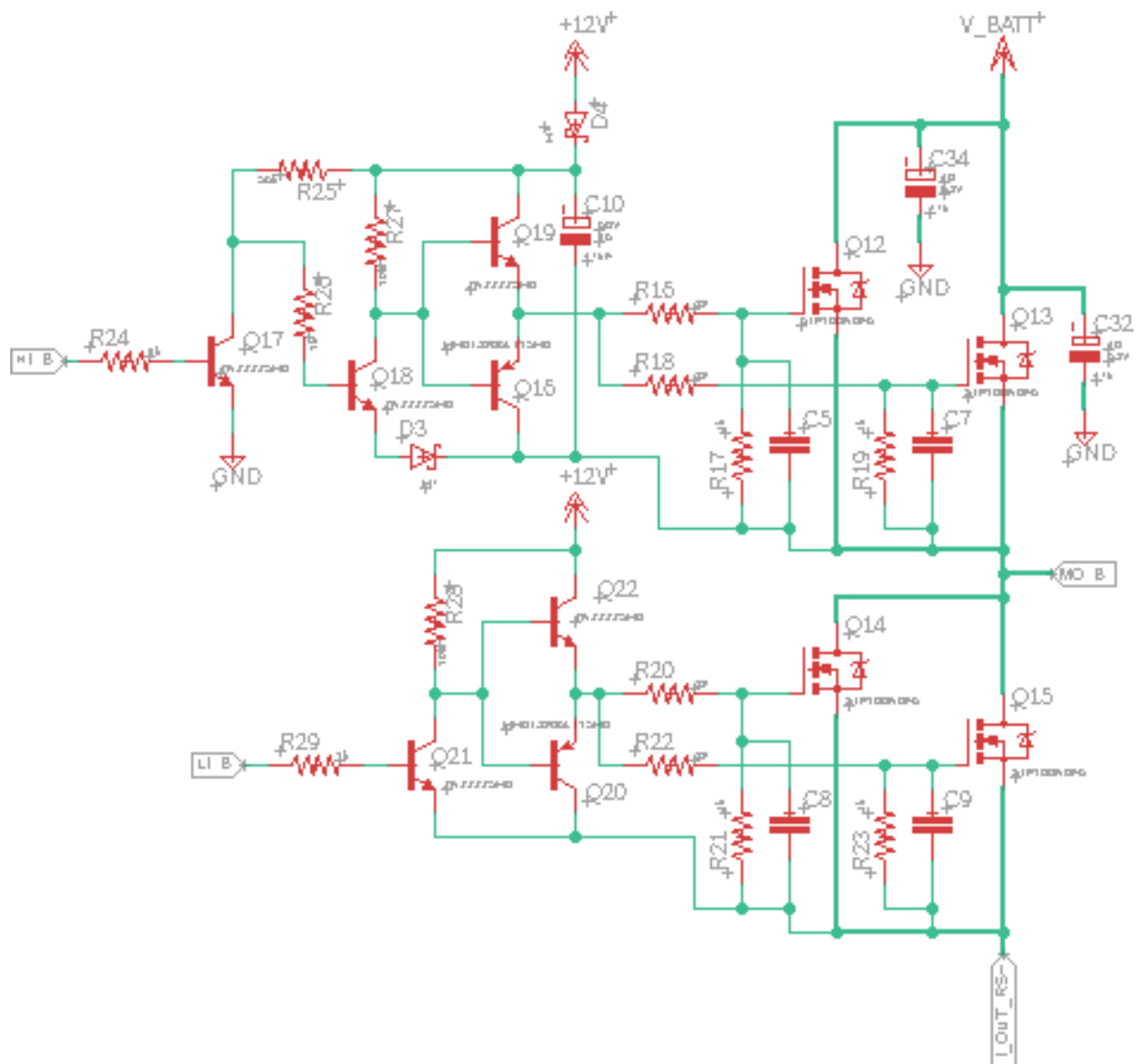
Gambar 3. 3 Diagram *flowchart* sistem

Gambar 3.3 merupakan diagram *flowchart* yang menjelaskan alur kerja sistem IMCO, dimana proses *switching* pada MOSFET bergantung pada *input* nilai *hall sensor* yang terbaca serta nilai *set point* yang ditentukan oleh *throttle*.

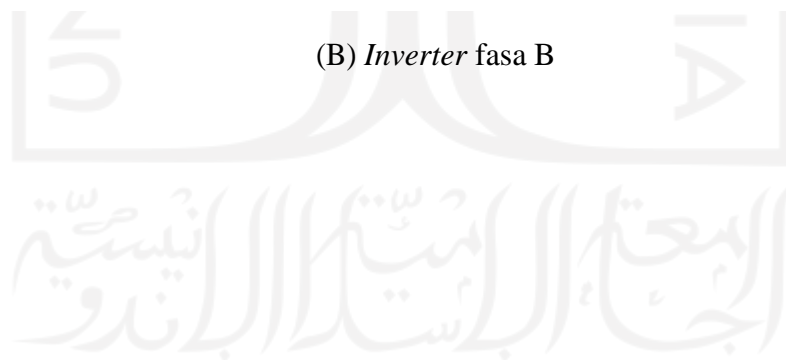
Tahap selanjutnya setelah pembuatan *flowchart* adalah melakukan pendesainan rangkaian elektronis dan PCB serta penentuan komponen yang digunakan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditentukan. Pendesainan rangkaian elektronis dan PCB dilakukan dengan menggunakan *software Autodesk EAGLE*. *Software* tersebut dipilih karena memiliki fitur yang lengkap serta *library* dari komponen yang digunakan mudah ditemukan di internet. Berikut adalah hasil pendesainan rangkaian elektronis beserta desain PCB:

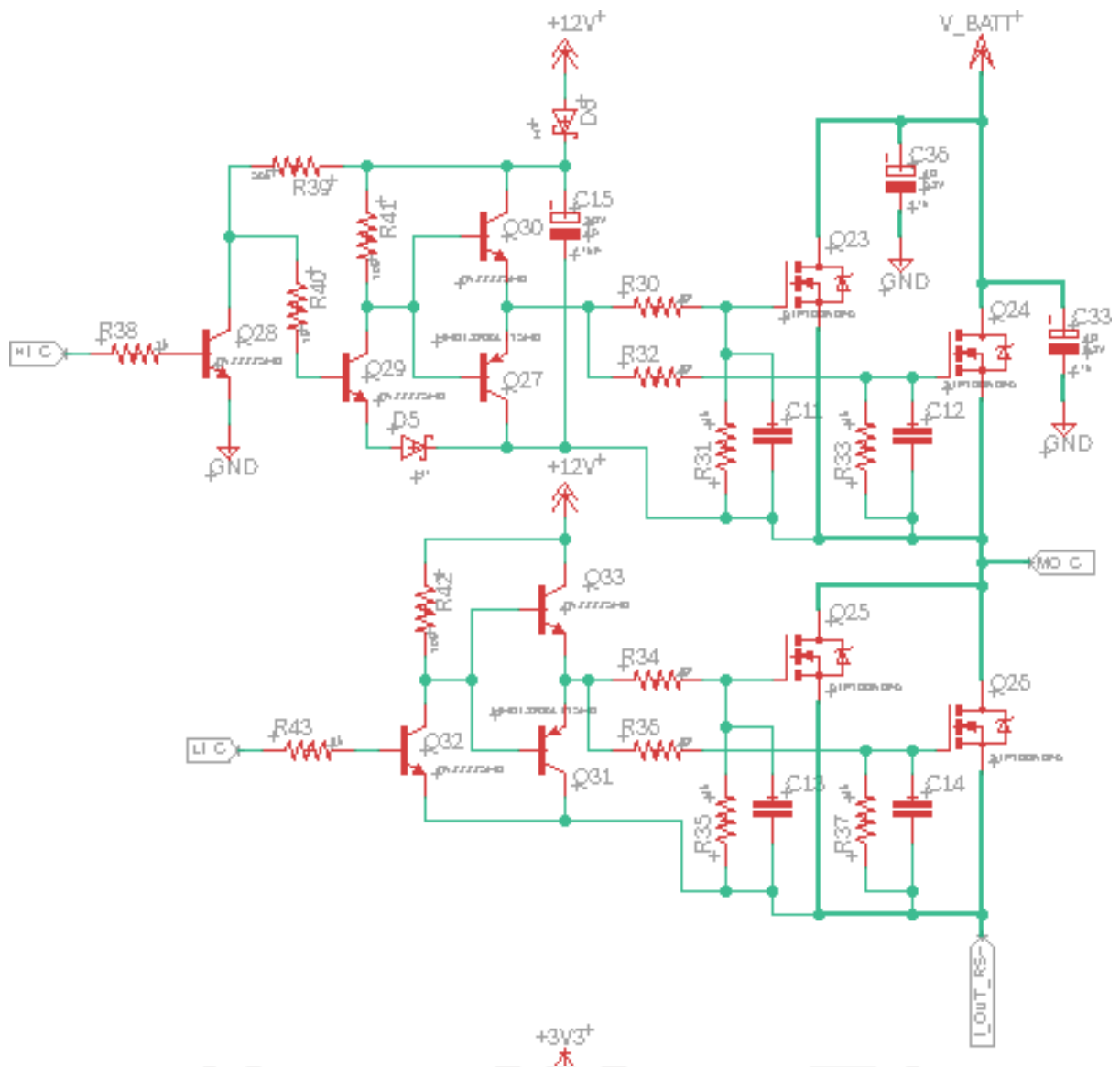


(A) *Inverter Fasa A*

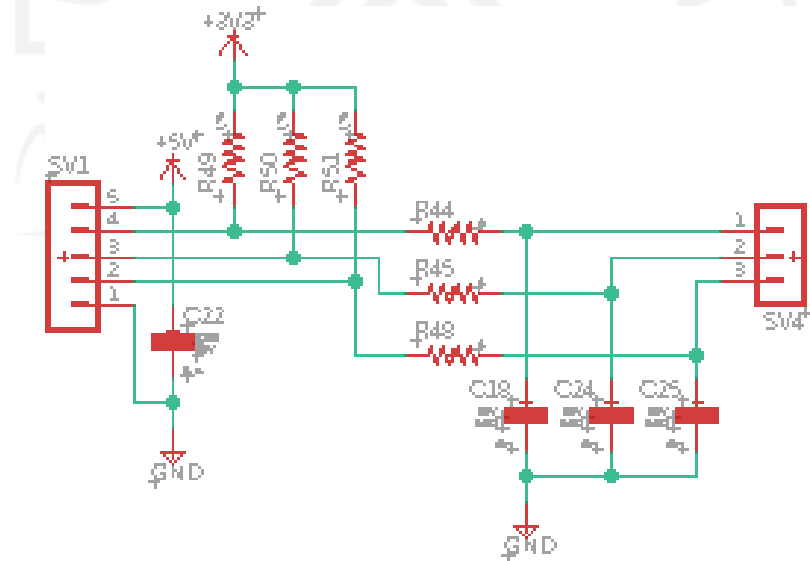


(B) *Inverter fasa B*

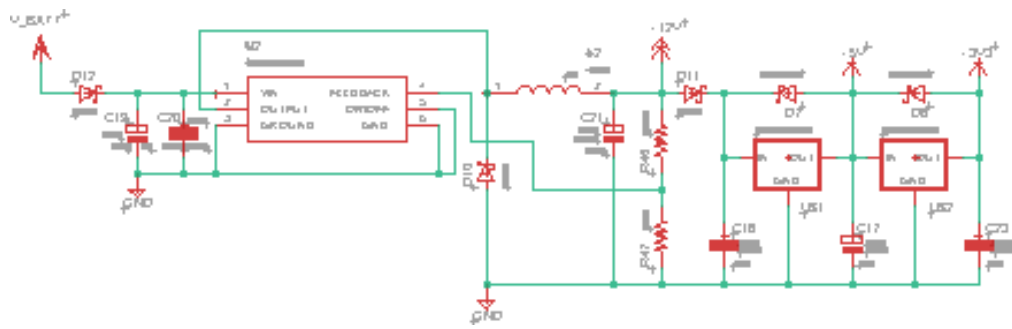




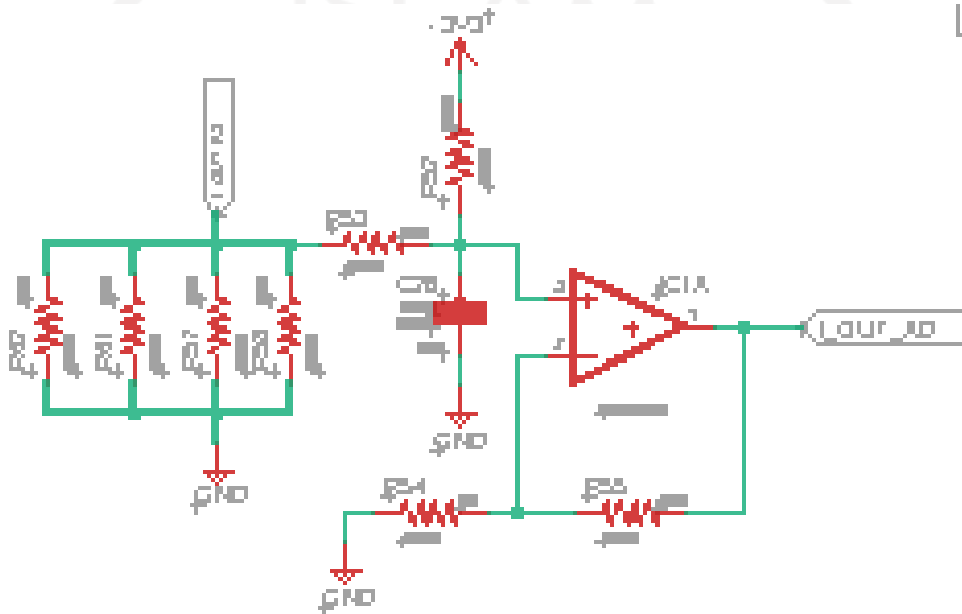
(C) Inverter fasa C



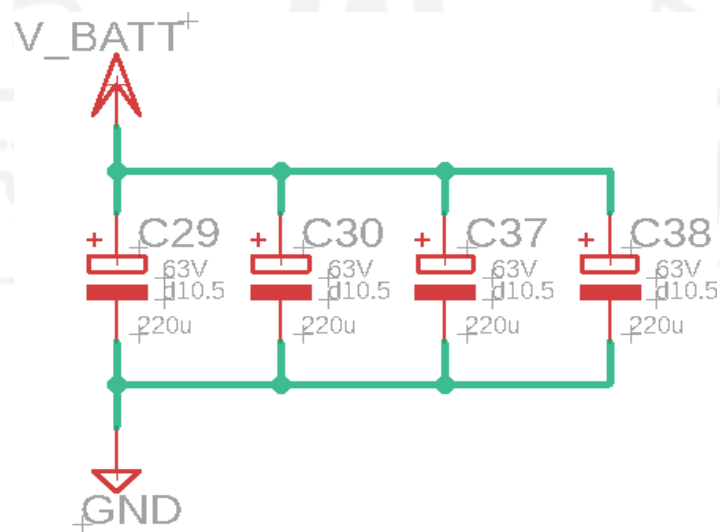
(D) Filter hall sensor



(E) Regulator tegangan

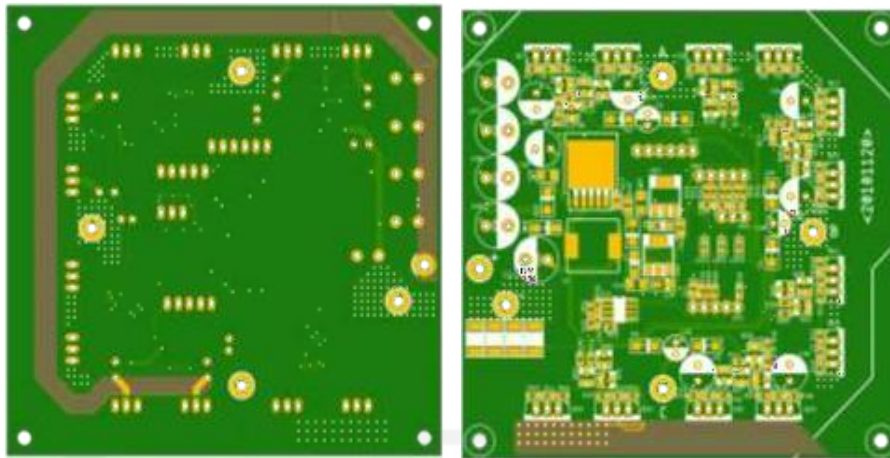


(F) Sensor arus



(G) Kapasitor bank

Gambar 3. 4 Skematik Elektronik Usulan



Gambar 3. 5 Desain PCB rangkaian

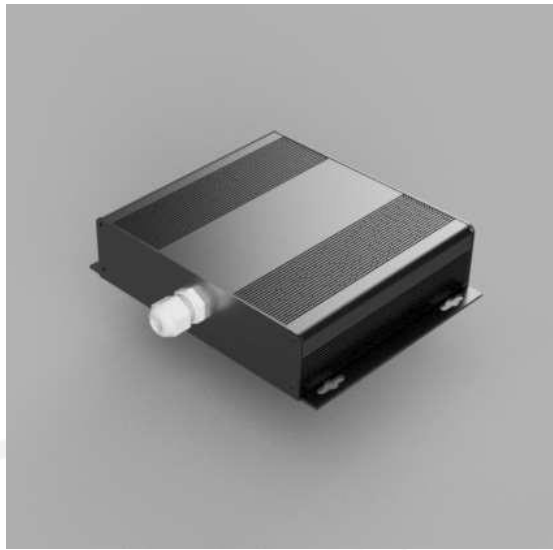
Pada Gambar 3. 4 terdapat beberapa blok rangkaian yang memiliki perannya masing-masing dalam kinerja sistem dari produk IMCO. Gambar 3.4 bagian A - C merupakan rangkaian *inverter* yang terdiri dari *driver* MOSFET berbasis rangkaian BJT totempole yang terhubung dengan MOSFET. Masing-masing *bridge* MOSFET dirancang secara paralel agar dapat dilewati arus besar. Gambar 3. 4 bagian D merupakan rangkaian *Low Pass Filter* yang berfungsi sebagai filter sinyal beserta rangkaian *pull up* resistor dari keluaran *hall sensor* pada motor BLDC. Gambar 3.4. bagian E merupakan rangkaian regulator yang terdiri dari regulator 12 V yang berfungsi sebagai supply driver MOSFET, regulator 5 V yang berfungsi sebagai *supply* 5 V, dan regulator 3.3 V yang berfungsi sebagai supply rangkaian *pull up* pada *hall sensor*. Gambar 3.4 bagian F merupakan rangkaian sensor arus berbasis *shunt* resistor yang diukur serta dikuatkan tegangannya melalui rangkaian penguat *Op-Amp*. Gambar 3.4 bagian G merupakan rangkaian kapasitor *Bank* yang berfungsi sebagai penyimpan muatan listrik sebelum dialirkan pada rangkaian *inverter*. Gambar 3.5 merupakan desain fisik PCB yang akan dijadikan sebagai media koneksi antar komponen pada produk IMCO.

Setelah melakukan pendesainan skema elektronik serta PCB, langkah selanjutnya adalah menentukan komponen yang digunakan berdasarkan spesifikasi sistem, sistem kerja produk, batas *budget* dari pembelian komponen serta ketersediaan komponen yang digunakan. Berikut adalah tabel dari komponen yang akan digunakan:

Tabel 3. 1 Daftar komponen untuk inventarisasi *Capstone Design*

No	Nama Komponen	Keterangan
1	Kapasitor 47 uF 63 V	Berfungsi sebagai penyimpan muatan listrik yang akan di supply ke MOSFET
2	Kapasitor 47 uF 25 V	Berfungsi sebagai Bootstrap kapasitor
3	Kapasitor 10 uF SMD 0603	Sebagai filter tegangan masuk regulator 5 V
4	Kapasitor 22 uF SMD 0603	Sebagai filter tegangan masuk regulator 3.3 V

No	Nama Komponen	Keterangan
5	Kapasitor 10 nF SMD 0603	Sebagai filter pada Op-Amp
6	Kapasitor 100 uF SMD 0603	Sebagai filter tegangan masuk regulator 12 V
7	Kapasitor 0.1 uF SMD 0603	Sebagai filter tegangan menuju arduino
8	Kapasitor 220 uF 63 V	Berfungsi sebagai filter tegangan baterai utama
9	Dioda M7	Sebagai penyearah tegangan charging kapasitor Bootstrap dengan frekuensi yang tinggi
10	Dioda MBR0520	Sebagai <i>bypass</i> dioda pada rangkaian regulator
11	Dioda SS54	Sebagai <i>forward</i> bias pada rangkaian regulator
12	Pin header	Berfungsi sebagai konektor PCB dengan perangkat lainnya
13	LM358 SMD	Berfungsi sebagai penguat tegangan dari tegangan hall sensor
14	Induktor 200 uH	Sebagai komponen LPF pada rangkaian regulator
15	LED SMD 0805	Berfungsi sebagai indikator On/Off controller
16	MOSFET IRF540N	IRF 540N dipilih karena memiliki spesifikasi yang sesuai dengan kebutuhan, yaitu mampu menahan tegangan maksimal 100 V dan arus sebesar 33A
17	Resistor 39 ohm SMD 0603	Resistor 39 ohm digunakan sebagai resistor gate pada MOSFET . Nilai 39 ohm digunakan supaya arus menuju gate MOSFET tidak terlalu berlebih
18	Resistor 20k ohm SMD 0603	Resistor 20k ohm digunakan untuk bleeding resistor atau pembuang muatan sisa pada MOSFET
19	Resistor 1k SMD 0603	Sebagai resistor rasio penguatan Op-Amp
20	Resistor 56k SMD 0603	Sebagai resistor rangkaian MOSFET <i>driver</i>
21	Resistor 10k SMD 0603	Sebagai resistor rasio penguatan Op-Amp
22	Resistor 40.2k SMD 0603	Sebagai resistor pembagi tegangan untuk regulator LM2576
23	Resistor 4.7k SMD 0603	Sebagai resistor pembagi tegangan untuk regulator LM2576
24	Resistor 5m SMD 2512	Berfungsi sebagai shunt resistor atau pengukur arus
25	Regulator AMS1117-5.0	Untuk menurunkan tegangan 12 V ke 5 V
26	Regulator AMS1117-3.3	Untuk menurunkan tegangan 5 V ke 3.3 V
27	LM2576	Untuk menurunkan tegangan 48 V ke 12 V
28	Transistor PNP MMBT3906LT1SMD	Sebagai komponen <i>driver</i> MOSFET
29	Transistor NPN 2N2222SMD	Sebagai komponen <i>driver</i> MOSFET
30	Box Instrument	Berfungsi sebagai pelindung komponen dari gangguan fisik sekaligus mendistribusikan panas yang dihasilkan oleh MOSFET
31	Arduino nano	Berfungsi sebagai pengendali komutasi
32	Arduino nano expansion board	Berfungsi sebagai alat bantu pengkoneksian kabel dari arduino menuju PCB
33	PCB	Berfungsi untuk mengkoneksikan pin-pin antara komponen
34	Kabel Gland	Berfungsi untuk tempat keluarnya kabel-kabel <i>controller</i>



Gambar 3. 7 Hasil desain *box* instrumen

Dapat dilihat pada Gambar 3.7 *box* instrumen yang dipakai memiliki *heatsink* pada bagian atas yang berfungsi untuk membuang panas yang dihasilkan oleh MOSFET. Pada bagian depan *box* terdapat kabel gland yang berfungsi sebagai jalur keluar kabel yang akan dikoneksikan ke baterai, motor, dan perangkat lainnya.

3.2 Metode Uji Coba dan Pengujian Usulan Rancangan Sistem

Dalam melakukan perancangan, perlu dilakukan uji coba untuk mengetahui kinerja serta performa alat yang telah dirancang. Metode uji coba ditentukan berdasarkan tahapan-tahapan pengerjaan yang dilakukan dari awal hingga akhir.

Metode uji coba:

1. Pengujian tegangan yang keluar dari regulator 12 V, 5 V, dan 3.3 V.
2. Pengujian nilai *output* sinyal PWM dengan 10 macam nilai *duty cycle*.
3. Pengujian rangkaian *bootstrap* pada driver MOSFET.
4. Pengujian sinyal keluaran *hall sensor* saat motor diputar secara manual.
5. Pengujian logika *outputs* digital komutasi 6 langkah.
6. Pengujian respon sinyal fasa ke *ground* saat motor diputar manual dengan tangan.
7. Pengujian konsumsi arus, nilai RPM, dan bentuk sinyal tiap fasa ke *ground* pada sepuluh variasi nilai *duty cycle* dan tiga variasi tegangan baterai pada motor BLDC tanpa beban.
8. Pengujian konsumsi arus, nilai RPM pada sepuluh variasi nilai *duty cycle*, tiga variasi nilai tegangan baterai dan tiga variasi beban pengendara pada motor BLDC yang sudah di instalasikan ke kendaraan motor listrik.

Metode pengujian sistem:

1. Pengujian tegangan regulator 12 V, 5 V, dan 3.3 V dilakukan dengan menggunakan multimeter yang dihubungkan dengan masing-masing *output* regulator.
2. Pengujian nilai *output* sinyal PWM dilakukan dengan memvariasikan nilai *duty cycle* sebanyak sepuluh variasi, mulai dari 10% hingga 100%. Masing-masing variasi tersebut akan dilakukan pengukuran tegangan output pada pin digital yang digunakan dengan menggunakan multimeter.
3. Pengujian rangkaian *bootstrap* MOSFET *driver* dilakukan dengan memberi dua *input* sinyal PWM (*High side* dan *Low side*) dengan *deadtime* selama 1 ms pada rangkaian *Bootstrap* kemudian pemberian supply tegangan utama (48 V) pada *drain* MOSFET *high side* dan *ground* pada *source* MOSFET *low side*. Kemudian dilakukan pengecekan sinyal PWM keluaran dari rangkaian *bootstrap*. Rangkaian *bootstrap* yang berhasil adalah rangkaian yang nilai amplitudo dari sinyal PWM nya mengalami peningkatan sesuai dari nilai *source* yang didapatkan dan tidak terdapat *short* pada sinyal PWM *high side* dan sinyal PWM *low side* yang dapat terjadi jika kondisi *high side* dan *low side* aktif secara bersamaan. Indikator bahwa tidak terdapat *short* pada sinyal PWM *high side* dan sinyal PWM *low side* adalah tidak ada arus yang mengalir pada supply tegangan utama sehingga MOSFET tidak panas.
4. Pengecekan *hall sensor* dilakukan dengan menghubungkan kabel *hall sensor* pada motor dengan rangkaian penguat tegangan yang telah dirancang, kemudian sinyal *output* penguatan tegangan pada rangkaian penguat dihubungkan ke osiloskop untuk melihat bentuk serta pola sinyal keluarannya.
5. Pengujian logika komutasi 6 langkah dilakukan dengan cara menguji enam pin digital yang akan dihubungkan dengan rangkaian *inverter* saat *microcontroller* mendapatkan *input* dari *hall sensor*. Pola *hall sensor* akan menentukan pola *output* digital dari 6 pin digital yang terhubung pada rangkaian *inverter*.
6. Pengujian respon sinyal *output* fasa ke *ground* dilakukan apabila keempat sistem diatas telah terpenuhi. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan *hall sensor* pada motor ke perangkat *controller*, kemudian hubungkan *probe* osiloskop pada kabel fasa *controller* dan putar motor secara manual. Kemudian sinyal respon dari *controller* akan ditampilkan pada layar osiloskop.
7. Pengujian konsumsi arus dan nilai RPM dilakukan dengan memberi *input* sepuluh variasi nilai *duty cycle* serta tiga variasi kondisi persentase kapasitas daya pada baterai pada perangkat *controller* yang sudah melewati lima pengujian sebelumnya, kemudian dilakukan pengukuran nilai arus yang terhubung dengan motor dan nilai RPM dari putaran motor.

8. Pengujian konsumsi arus dan kecepatan kendaraan dilakukan dengan memberi *input* sepuluh variasi nilai *duty cycle*, tiga variasi kondisi persentase energi pada baterai, serta tiga variasi beban pengendara pada perangkat *controller* yang sudah terinstal pada kendaraan listrik, kemudian dilakukan pengukuran nilai arus yang terhubung dengan motor serta kecepatan kendaraan.



BAB 4: Hasil Perancangan Sistem

4.1 Kesesuaian Usulan dan Hasil Perancangan Sistem

Pada tahap perancangan serta pengujian hasil perancangan sistem, terdapat ketidaksesuaian hasil yang telah didapatkan. Diantaranya adalah rangkaian regulator tegangan 48 - 12 V yang tidak bekerja sesuai rencana. Rangkaian regulator yang diusulkan tidak cukup memenuhi kebutuhan arus dari rangkaian yang akan di *supply*, sehingga dilakukan penggantian regulator tersebut dengan menggunakan modul DC-DC *step down* 48 - 12 V 10 A. Konsekuensi dari kesalahan tersebut adalah mundurnya waktu pengerjaan sehingga tidak sesuai jadwal yang telah dibuat.

Tabel 4. 1 Perbandingan usulan dan hasil perancangan sistem

No	Spesifikasi	Usulan	Realisasi
1	Fitur	Pengendali kecepatan putar motor	Pengendali kecepatan putar motor
2	Batas arus maksimal	20 A	40 A
3	Rangkaian <i>driver</i> MOSFET	Menggunakan IC IR2101	Menggunakan rangkaian transistor BJT Totempole
4	Indikator kecepatan	Menggunakan LCD	Tidak ada
5	Stepdown 48V - 12 V	Modul LM2596HVS 5-60 V ke 12 V 3 A	Modul Step down 36-72 V ke 12 V 10 A
6	Indikator <i>controller</i> yang aktif (<i>controller</i> motor atau rem regeneratif)	Menggunakan LED	Tidak ada
7	Tipe MOSFET	IRF540N 33 A 100 V	IRFb4227 200 V 120 A

4.2 Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya

Pada proses perancangan perangkat IMCO, terdapat beberapa masalah yang mengakibatkan hasil tidak sesuai dengan usulan sehingga terjadi kemunduran jadwal yang tidak sesuai dengan target yang ditentukan. Realisasi waktu pelaksanaan dengan usulan waktu yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 4.2. Melihat terdapat perubahan desain dengan usulan awal yang ditawarkan, maka terdapat perubahan *timeline* pengerjaan dan Rancangan Anggaran Belanja (RAB) yang dapat dilihat pada Tabel 4.2. dan Tabel 4.3.

Tabel 4. 2 Kesesuaian usulan dan realisasi *timeline* pengerjaan tugas akhir 2

No	Kegiatan	Usulan waktu	Realisasi Pelaksanaan
1.	Pembelian alat dan bahan	Maret	Maret
2.	Perancangan skematik rangkaian	Maret - April	Maret
3.	Pendesainan dan cetak PCB	Maret - April	April
4.	Pengujian regulator tegangan	Mei	April
5.	Pengujian 10 variasi nilai tegangan <i>output</i> PWM	Mei	Mei
6.	Pengujian <i>driver</i> MOSFET	Mei - Juni	Juni
7.	Pengujian sinyal <i>hall</i> sensor	Mei - Juni	Juni
8.	Pengujian logika komutasi 6 langkah	Mei - Juni	Juni
9.	Pengujian respon 3 fasa ke <i>ground</i> terhadap <i>hall</i> sensor	Mei - Juni	Juni
10.	Pengujian konsumsi arus dan RPM motor pada 10 variasi nilai <i>duty cycle</i>	Mei - Juni	Juli
11.	Pengujian pada kendaraan motor	Juni	Juli
12.	<i>Finishing</i>	Juni	Juli

Tabel 4. 3 Kesesuaian usulan dan realisasi RAB tugas akhir

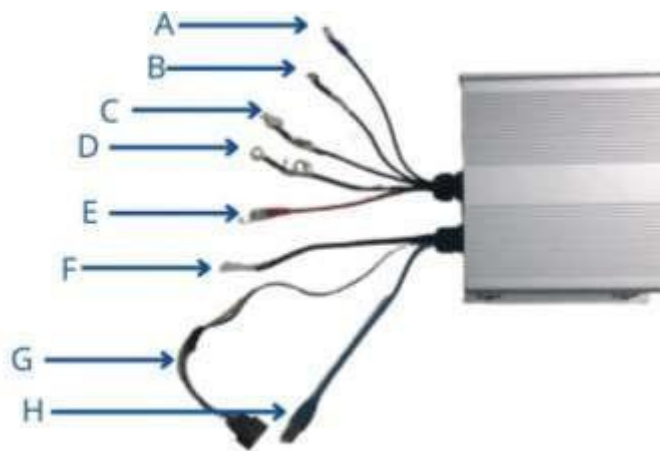
No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Jenis Pengeluaran	Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga		Kuantitas	Total Harga
1	-	-	-	Kapasitor 47uF 63V	7	Rp 14.000
2	Kapasitor 470 uF 25v	3	Rp 4.500	Kapasitor 47uF 25V	3	Rp 6.000
3	-	-	-	Kapasitor 10uF SMD 0603	1	Rp 500
4	-	-	-	Kapasitor 22uF SMD 0603	1	Rp 500
5	Kapasitor 47 nF	3	Rp 300	Kapasitor 10nF SMD 0603	5	Rp 2.500
6	-	-	-	Kapasitor 100uF SMD 0603	1	Rp 500

No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Jenis Pengeluaran	Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga		Kuantitas	Total Harga
7	-	-	-	Kapasitor 0.1 uF SMD 0603	3	Rp 1.500
8	Kapasitor 470 uF 63V	5	Rp 7.500	Kapasitor 220 uF 63V	4	Rp 16.000
9	Dioda 1n4148	6	Rp 600	Dioda M7	6	Rp 1.200
10	-	-	-	Dioda MBR0520	2	Rp 1.000
11	-	-	-	Dioda SS54	3	Rp 3.000
12	-	-	-	Kabel 6 mm	5m	Rp 55.000
13	-	-	-	LM358 SMD	1	Rp 1.500
14	-	-	-	Inductor 200uH	1	Rp 4.000
15	-	-	-	LED SMD 0805	3	Rp 600
16	MOSFET irf540n	12	Rp 300.000	MOSFET STP60NF10	6	Rp 150.000
17	Resistor 220 ohm	6	Rp 600	Resistor 39 ohm SMD 0603	12	Rp 1.200
18	-	-	-	Resistor 20k ohm SMD 0603	6	Rp 2.400
19	Resistor 1k ohm	2	Rp 200	Resistor 1k SMD 0603	10	Rp 1.000
20	Resistor 2.2k ohm	6	Rp 2.400	Resistor 56k SMD 0603	6	Rp 1.500
21	-	-	-	Resistor 10k SMD 0603	8	Rp 800
22	-	-	-	Resistor 40.2k SMD 0603	1	Rp 200
23	-	-	-	Resistor 4.7k SMD 0603	7	Rp 700
24	Modul sensor arus	1	Rp 25.000	Resistor 5m SMD 2512	4	Rp 8.000
25	IC LM 7805	1	Rp 1.300	Regulator AMS1117-5.0	1	Rp 2.000
26	-	-	-	Regulator AMS1117-3.3	1	Rp 2.000
27	-	-	-	LM2576	1	Rp 10.000
28	IR 2110	3	Rp 75.000	Transistor PNP MMBT3906LT1S MD	6	Rp 1.800

No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Jenis Pengeluaran	Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga		Kuantitas	Total Harga
29	-	-	-	Transistor NPN 2N2222SMD	15	Rp 4.500
30	Box Instrument	1	Rp 157.000	Box Instrument	1	Rp 235.000
31	Arduino nano	1	Rp 75.000	Arduino nano	1	Rp 120.000
32	-	-	-	Arduino nano expansion board	1	Rp 25.000
33	PCB	2	Rp 160.000	PCB	1	Rp 230.000
34	-	-	-	Kabel Gland	1	Rp 3000
35	-	-	-	Modul stepdown 48-12 V 10 A	1	Rp 100.000
36	T-blok 2 pin	1	Rp 550	-	-	-
37	Flux solder	1	Rp 30.000	Flux solder	1	Rp 30.000
38	T-blok 3 pin	2	Rp 10.000	-	-	-
39	Pin header	2	Rp 2.000	Pin header	2	Rp 2.000
40	T-blok 5 pin	1	Rp 10.600	-	-	-
41	Timah solder	1	Rp 4.000	Timah solder	1	Rp 4.000
42	Kabel jumper	1	Rp 30.000	Kabel jumper	1	Rp 30.000
43	Modul relay 3 channel	1	Rp 154.000	-	-	-
44	Modul mppt controller	1	Rp 555.000	-	-	-
			Rp 1.605.550			1.072.400

4.3 Analisis dan Pembahasan Kesesuaian antara Perencanaan dan Realisasi

Pada bagian ini akan dilakukan analisis serta pembahasan tentang kesesuaian produk antara tahap perencanaan dengan tahap realisasi.



Gambar 4. 1 Tampak luar produk IMCO

Dapat dilihat pada Gambar 4.1 produk IMCO memiliki delapan kabel keluaran yang memiliki fungsi yang berbeda-beda. Berikut adalah fungsi dari masing-masing kabel keluarannya:

- a. A = Kabel fasa A
- b. B = Kabel fasa B
- c. C = Kabel fasa C
- d. D = Kabel baterai negatif
- e. E = Kabel baterai positif
- f. F = Kabel *throttle*
- g. G = Kabel *hall sensor*
- h. H = Kabel USB arduino nano



Gambar 4. 2 Tampak dalam produk IMCO

Gambar 4.2 merupakan penampakan produk IMCO dalam keadaan terbuka. Secara garis besar, perangkat yang ada di dalam produk ini adalah arduino nano sebagai *microcontroller* dan *board inverter* sebagai rangkaian elektronika daya dari produk IMCO.

Dalam realisasinya, terdapat beberapa perubahan yang dilakukan dikarenakan beberapa

faktor yang terjadi, baik dari faktor rasionalisasi waktu pengerjaan, rancangan sistem yang tidak berjalan sesuai yang direncanakan, dan juga perubahan dengan menambahkan beberapa rangkaian tambahan setelah melakukan uji coba yang tidak tertera pada usulan produk. IMCO memiliki tingkat realisasi sebesar 60% dari perencanaan yang telah diusulkan di awal. Beberapa diantaranya adalah penghapusan fitur rem regeneratif, penggantian rangkaian *gate driver*, penggantian tipe MOSFET, serta penambahan rangkaian *pull up* pada komponen *hall sensor*. Adapun penjelasan mengenai perubahan-perubahan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Penggantian rangkaian *gate driver* yang awalnya menggunakan IC IR2110 menjadi menggunakan rangkaian BJT totempole yang didapatkan setelah melakukan *Reverse Engineering* pada skematik BLDC *controller* pada *hoverboard*.
2. Penggantian tipe MOSFET penggantian tipe MOSFET yang awalnya menggunakan tipe IRF540N menjadi IRFB4227 dengan alasan MOSFET tersebut memiliki batas arus yang lebih tinggi sehingga dapat memperpanjang umur MOSFET.
3. Penambahan rangkaian *pull up* pada hall sensor karena sinyal *output* yang dihasilkan *hall sensor* tidak dapat terbaca pada pin digital arduino nano.

Spesifikasi teknis:

1. Rentang tegangan = 48 - 60 V
2. Arus maksimal = 40 A
3. Rentang kerja *duty cycle* saat motor berjalan = 5 - 100 %
4. Frekuensi PWM = 30 kHz
5. Sensor = *Hall Sensor effect*
6. Bentuk sinyal output = *Trapezoidal Waveform*
7. pengendali = *Throttle handle gas*

BAB 5: Implementasi Sistem dan Analisis

5.1 Hasil dan Analisis Implementasi

Produk IMCO dapat dikatakan berhasil apabila telah melewati tahap implementasi dengan baik. Adapun pengujian yang akan dilakukan adalah berupa pengukuran tegangan, arus, dan rpm pada beberapa pengujian dengan tujuan mengetahui performa serta ketahanan dari produk yang dirancang.

5.1.1 Pengujian Tegangan Regulator

Langkah awal dalam melakukan pengujian produk adalah pengujian tegangan keluaran pada tiap-tiap regulator untuk memastikan bahwa tiap-tiap komponen yang ada mendapatkan *supply* tegangan yang sesuai dengan ketentuannya. Berikut adalah tabel hasil pengujian tegangan regulator:

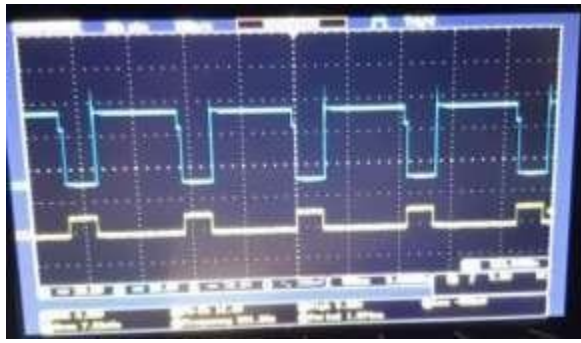
Tabel 5. 1 Pengujian tegangan regulator

No	Vout (volt)	
	Hasil perhitungan	Hasil pengukuran
1	12 V	11.93 V
2	5 V	4.95 V
3	3.3 V	3.29 V

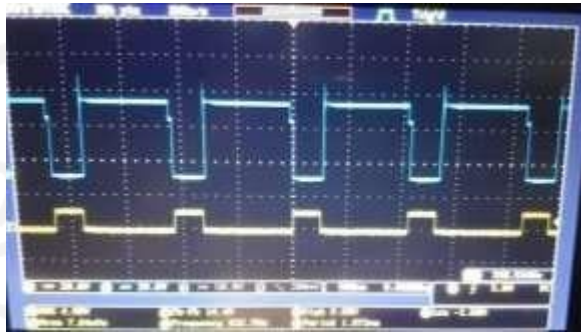
Berdasarkan hasil pengujian tegangan pada tiga rangkaian regulator yang tertera pada Tabel 5.1. dapat dilihat bahwa masih terdapat selisih perbedaan antara nilai *output* dengan nilai *input* dengan nilai rata-rata sebesar 3-4%, dimana angka tersebut masih dapat ditoleransi oleh rangkaian yang akan di *supply*.

5.1.2 Pengujian *bootstrap* MOSFET *driver* Tiap Fasa

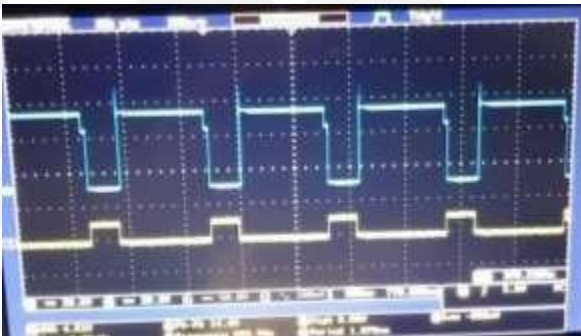
Pengujian rangkaian *bootstrap* MOSFET *driver* dilakukan dengan cara memberikan sinyal PWM yang saling berlawanan pada kedua masukan rangkaian *driver* MOSFET lalu memberi daya beban pada rangkaian *bridge* MOSFET. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian *driver* telah berhasil mengaktifkan MOSFET serta memastikan bahwa tidak terjadi *short* saat pensaklaran MOSFET berdasarkan sinyal PWM masukan.



Gambar 5. 1 Pengujian *bootstrap* pada fasa A



Gambar 5. 2 Pengujian *bootstrap* pada fasa B



Gambar 5. 3 Pengujian *bootstrap* pada fasa C

Pada gambar 5.1 , gambar 5.2 , dan gambar 5.3 menunjukkan bahwa *driver* MOSFET telah berhasil melakukan penguatan tegangan dari *input* sinyal PWM. Sinyal *input* digambarkan dengan sinyal berwarna kuning dan sinyal *output* digambarkan dengan sinyal berwarna biru. Sinyal *output* tersebut akan masuk ke *gate* MOSFET untuk melakukan *switching gate* MOSFET.



Gambar 5. 4 Konsumsi arus pada rangkaian *bootstrap* dan beban

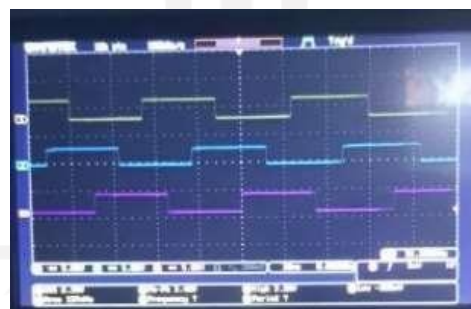
Pada Gambar 5.4 pada arus *channel 1* (kanan) tidak menunjukkan adanya arus yang mengalir dimana ini menunjukkan bahwa tidak ada *short* antar sinyal PWM. Kemudian pada *channel 2* (kiri) menunjukkan konsumsi arus yang dibutuhkan oleh *driver* MOSFET.

5.1.3 Pengujian Sinyal *Hall Sensor*

Pengujian *hall sensor* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sinyal pola keluaran *hall sensor* serta memastikan bahwa *hall sensor* dapat berfungsi dengan baik.



Gambar 5. 5 Proses pengujian sinyal *hall sensor* dengan cara motor diputar secara manual



Gambar 5. 6 Hasil keluaran sinyal *hall sensor* pada osiloskop

Dapat dilihat pada Gambar 5.5 pengujian *hall sensor* dilakukan dengan cara memutar motor secara manual untuk mengubah posisi magnet pada stator motor. Hasil pengujian sinyal keluaran *hall sensor* dapat dilihat pada Gambar 5.6 Sinyal tersebut membentuk pola sinyal kotak dengan jarak pola sinyal pada masing-masing sensor sebesar 120° mekanik.

5.1.4 Pengujian Komutasi 6 Langkah

Pengujian komutasi 6 langkah dilakukan untuk memastikan bahwa output trigger yang akan dihasilkan oleh *microcontroller* berdasarkan pembacaan *hall sensor* sudah benar, sehingga

tidak terjadi hubung singkat antar siklus yang dapat menyebabkan motor tidak dapat berputar dengan baik dan dapat menyebabkan kerusakan pada komponen MOSFET.

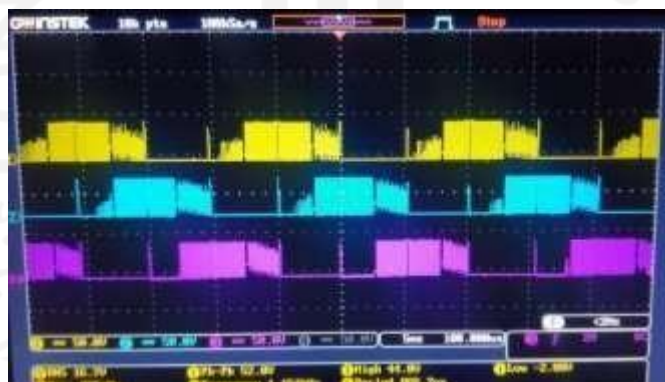
Tabel 5. 2 Pengujian komutasi 6 langkah

step	hall A	hall B	hall C	phase U	phase V	phase W	high A	low A	high B	low B	high C	low C	Kesimpulan
1	1	0	0	+	0	-	PWM	0	0	0	0	1	Benar
2	1	1	0	0	+	-	0	0	PWM	0	0	1	Benar
3	0	1	0	-	+	0	0	1	PWM	0	0	0	Benar
4	0	1	1	-	0	+	0	1	0	0	PWM	0	Benar
5	0	0	1	0	-	+	0	0	0	1	PWM	0	Benar
6	1	0	1	+	-	0	PWM	0	0	1	0	0	Benar
1	1	0	0	+	0	-	PWM	0	0	0	0	1	Benar
2	1	1	0	0	+	-	0	0	PWM	0	0	1	Benar
3	0	1	0	-	+	0	0	1	PWM	0	0	0	Benar
4	0	1	1	-	0	+	0	1	0	0	PWM	0	Benar
5	0	0	1	0	-	+	0	0	0	1	PWM	0	Benar
6	1	0	1	+	-	0	PWM	0	0	1	0	0	Benar

Berdasarkan hasil pengujian yang tertera pada Tabel 5.2 hasil dari pengujian menunjukkan bahwa komutasi telah berjalan sesuai dengan tabel yang telah ditentukan.

5.1.5 Pengujian Sinyal Fasa-Ground pada Motor Tanpa Beban

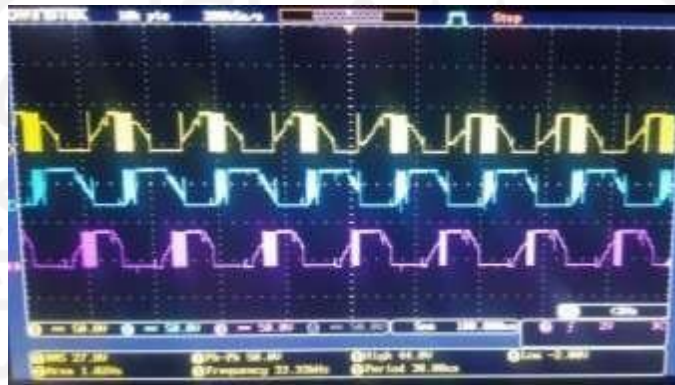
Pengujian sinyal fasa-ground pada motor tanpa beban bertujuan untuk melihat sinyal keluaran inverter tiga fasa berdasarkan nilai duty cycle yang ditentukan pada throttle. Pengujian ini mengacu pada standar **IEC 61683-1999** tentang pengujian inverter berdasarkan efisiensi, sinyal ripple, bentuk sinyal keluaran dengan beban, serta suhu dari perangkat.



(A) Duty cycle 25%



(B) *Duty cycle 50%*



(C) *Duty cycle 75%*



(D) *Duty cycle 100%*

Gambar 5. 7 Bentuk sinyal tiga fasa ke *ground*

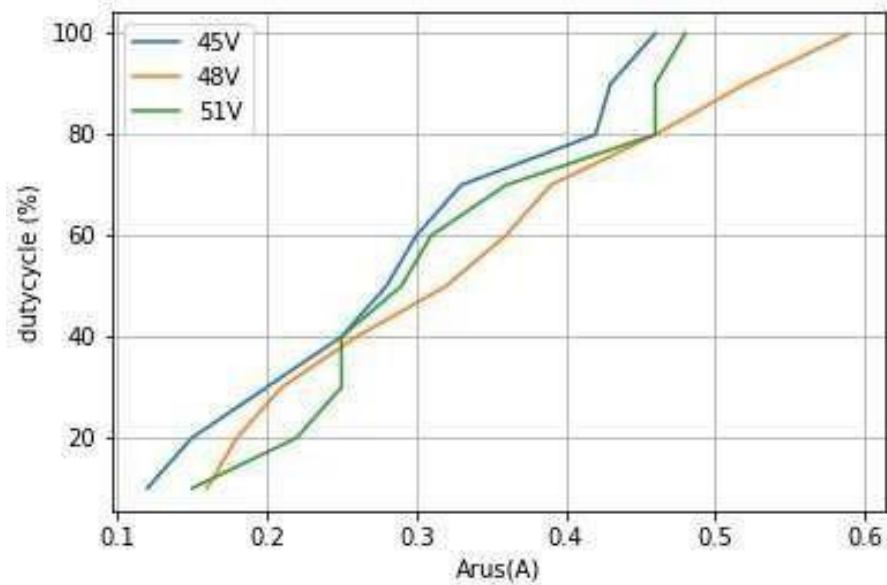
Gambar 5.7 merupakan bentuk sinyal fasa ke *ground* pada tiga variasi *duty cycle*. Dapat dilihat dari bentuk sinyal menunjukkan bentuk sinyal *trapezoidal wave* dengan *chopping* berdasarkan setpoint *duty cycle*. Pada saat melakukan pengujian, dilakukan pula pengukuran suhu pada MOSFET untuk melihat keandalan dari perangkat *inverter*. Dan suhu pada MOSFET menunjukkan di angka 45° C pada semua percobaan variasi *duty cycle*.

5.1.6 Pengujian Nilai RPM dan Arus pada Motor Tanpa Beban

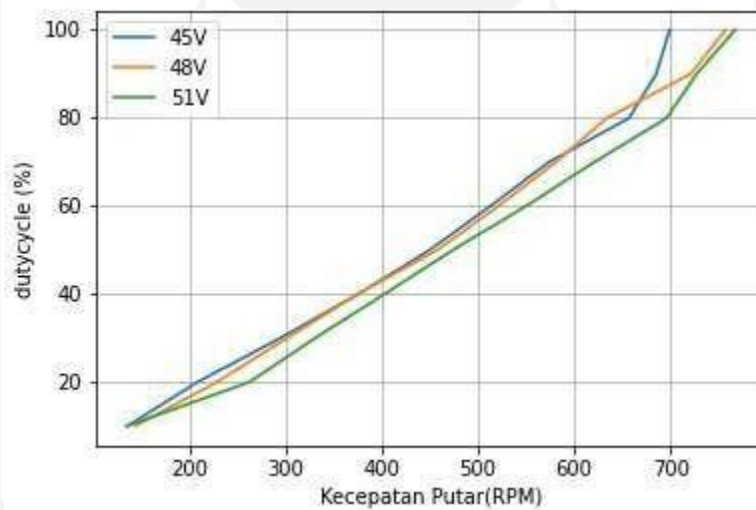
Pengujian ini bertujuan untuk melihat performa kinerja dari produk yang telah dirancang. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan *duty cycle* sebanyak sepuluh variasi dan memvariasikan tegangan sebanyak tiga variasi tegangan. Pengujian ini dikatakan berhasil apabila nilai arus serta RPM pada motor BLDC akan linier dengan nilai *duty cycle* yang dimasukkan. Penentuan tegangan pada 45, 48, dan 51 V adalah berdasarkan dari kondisi baterai pada saat kondisi penuh, kondisi kapasitas daya setengah, dan kapasitas daya baterai saat menuju habis.

Tabel 5. 3 Pengujian arus dan RPM pada tegangan 45, 48, dan 51 V

No	Duty Cycle	Arus (A)			Putaran motor (RPM)		
		45 V	48 V	51 V	45 V	48 V	51 V
1	10%	0,12	0,16	0,15	136	144	135
2	20%	0,15	0,18	0,22	209	229	263
3	30%	0,2	0,21	0,25	295	302	331
4	40%	0,25	0,26	0,25	376	375	403
5	50%	0,28	0,32	0,29	450	458	474
6	60%	0,3	0,36	0,31	513	521	550
7	70%	0,33	0,39	0,36	574	581	621
8	80%	0,42	0,46	0,46	657	634	696
9	90%	0,43	0,52	0,46	685	721	727
10	100%	0,46	0,59	0,48	699	757	767



Gambar 5. 8 Grafik arus terhadap *duty cycle*



Gambar 5. 9 Grafik RPM terhadap *duty cycle*

Tabel 5.3 merupakan hasil pengujian perangkat IMCO pada motor BLDC tanpa beban dengan menggunakan tiga variasi tegangan yaitu 45 V, 48 V, dan 51 V. Pada tabel tersebut juga ditampilkan nilai arus dan kecepatan putaran motornya pada setiap variasi tegangan berdasarkan nilai *duty cycle*. Gambar 5.8 menunjukkan grafik arus terhadap *duty cycle* pada setiap variasi tegangan dan gambar 5.9 menunjukkan grafik RPM terhadap *duty cycle*. Hasil menunjukkan bahwa RPM serta arus pada perangkat akan meningkat seiring dengan bertambahnya nilai pada *duty cycle*.

5.2 Pengalaman Pengguna

Dalam implementasinya, produk IMCO belum dapat diimplementasikan pada kendaraan listrik secara langsung sehingga bentuk pengalaman pengguna pada tabel yang terlampir adalah bentuk pengalaman dalam penggunaan produk tanpa diimplementasikan pada kendaraan listrik.

Tabel 5. 4 Pengalaman pengguna

No	Fitur/Komponen	Capaian	Aksi/Perbaikan
1	Fungsi	Motor BLDC dapat berputar dengan kecepatan sesuai dengan set point yang ditentukan oleh <i>throttle</i>	Dipertahankan
2	Kemudahan	Produk IMCO mudah untuk diaplikasikan pada kendaraan motor listrik	Dipertahankan
3	Keamanan	Produk IMCO terdapat <i>safety system</i> berupa pembatas arus sebesar 40A sebagai pengaman komponen-komponen didalamnya. Dimana jika arus kerja motor mencapai 40A maka controller akan berhenti bekerja.	Perbaikan dengan menambahkan skema penurunan tegangan saat arus sudah mencapai 40A sehingga kecepatan motor melambat dan tidak langsung ke keadaan mati.
4	Fitur	Produk IMCO hanya memiliki satu fitur utama yaitu sistem kendali putar motor BLDC berdasarkan setpoint yang didapat dari nilai <i>throttle</i>	Perbaikan dengan menambah fitur membalik arah putar, kendali tanpa menggunakan <i>hall sensor</i> , dan sistem <i>monitoring</i>
5	Teknologi	Produk IMCO memiliki tipe sinyal <i>trapezoidal wave</i> sehingga tarikan pertama saat berkendara terasa menghentak	Perbaikan dengan menggunakan metode <i>sinusoidal wave</i> untuk memperhalus putaran awal motor

Dapat dilihat pada Tabel 5.4 bahwa produk IMCO memiliki beberapa capaian yang perlu dipertahankan dan beberapa lainnya yang perlu diperbaiki. Sehingga dapat disimpulkan bahwa produk IMCO masih perlu pengembangan lebih lanjut untuk dapat memenuhi ekspektasi para pengguna.

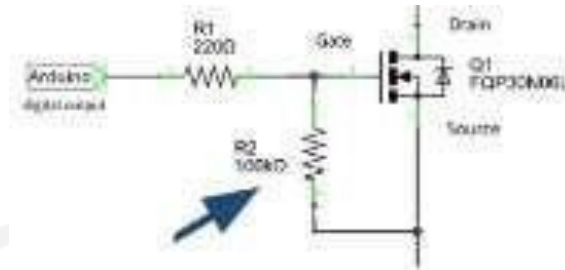
5.3 Dampak Implementasi Sistem

Dalam implementasinya, produk IMCO akan memberikan dampak dalam aspek teknologi/inovasi dan ekonomi, berikut adalah pemaparannya:

5.3.1 Teknologi/Inovasi

Dalam proses perancangan produk IMCO, terdapat beberapa kesalahan yang memicu penyelesaian masalah yang dapat diterapkan oleh pengembang sistem kendali motor BLDC selanjutnya. diantaranya adalah:

1. Penggunaan *bleeding resistor* pada *gate* MOSFET yang berfungsi sebagai pembuang muatan sisa saat MOSFET dalam keadaan *OFF*. *Bleeding resistor* dapat membuat *timing* pensaklaran menjadi lebih tepat karena muatan sisa pada MOSFET saat setelah keadaan *ON* langsung terbuang.



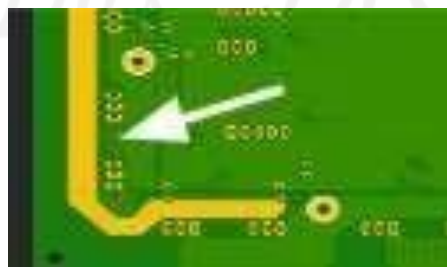
Gambar 5. 10 Resistor *bleeding* pada *gate* MOSFET

2. Penggunaan modul DC-DC *step down* 48-12 V 10 A sebagai regulator tegangan 12 V pada *supply* tegangan MOSFET *driver* untuk mengganti rangkaian *buck converter* LM259HV 3 A. Hal ini dikarenakan rangkaian *buck converter* LM259HV yang tertera pada rancangan usulan tidak dapat *men-drive* rangkaian MOSFET *driver* dengan baik.



Gambar 5. 11 Modul DC-DC *buck converter*

3. Perancangan jalur *high voltage* pada PCB dengan menggunakan jalur yang tidak menggunakan *silkscreen* dengan tujuan agar jalur tersebut dapat dilapisi kembali dengan timah sehingga arus besar yang mengalir tidak merusak jalur akibat jalur yang tidak dapat menahan arus besar.



Gambar 5. 12 Jalur T-stop pada PCB

5.3.2 Ekonomi

Kendaraan listrik merupakan kendaraan dengan efisiensi yang lebih baik jika dibandingkan kendaraan konvensional. Tingkat efisiensi yang baik ini akan berdampak pada penghematan biaya pengeluaran untuk pembelian bahan bakar. Dalam perhitungannya, kendaraan motor listrik hanya membutuhkan 0.028 kWh per Km nya atau setara dengan Rp40.43,00 /Km. Sedangkan kendaraan konvensional membutuhkan 0,02 L per Km nya atau setara dengan Rp 138,00 /Km. Maka dapat disimpulkan bahwa konsumsi energi pada kendaraan listrik lebih murah sekitar 60% dibandingkan kendaraan konvensional.



BAB 6: Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Produk IMCO dirancang sebagai salah satu perangkat utama dari kinerja sistem kendaraan listrik secara keseluruhan. yang bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan krisis energi dan isu lingkungan. Produk IMCO dirancang dengan beberapa penyesuaian kinerja sistem berdasarkan hasil dari kegiatan *design thinking*, yaitu sebagai sistem kendali motor BLDC 48 V 1000 W yang akan diimplementasikan pada kendaraan listrik roda dua. Berdasarkan hasil pengujian, IMCO telah mampu mengatur kecepatan putar motor BLDC sesuai dengan set point yang ditentukan oleh *throttle*. Data yang didapat menunjukkan arus dan kecepatan putar (RPM) berbanding lurus dengan *duty cycle*.

6.2 Saran

Dari hasil perancangan produk IMCO, masih terdapat beberapa kekurangan yang dapat dijadikan sebagai bahan perbaikan oleh pengembang sistem kendali motor BLDC pada kendaraan listrik kedepannya. berikut adalah saran perbaikan yang diantaranya adalah:

1. Penggunaan metode *sinusoidal commutation* yang dapat memperhalus putaran motor serta akselerasi awal putaran.
2. Penambahan fitur rem regeneratif yang dapat mengisi daya baterai saat motor BLDC berubah fungsi menjadi generator pada kondisi turunan.
3. Penambahan fitur *reverse rotation* agar pengendara dapat dengan mudah berjalan mundur pada kondisi-kondisi tertentu seperti saat sedang di parkir.
4. Penggunaan rangkaian *isolated gate driver* pada rangkaian MOSFET *driver* agar tidak terjadi *delay switching* akibat pengisian *bootstrap* kapasitor pada rangkaian totempole.

Daftar Pustaka

- [1] “Krisis Energi atau Krisis Energi Fosil? - IESR.” <https://iesr.or.id/krisis-energi-atau-krisis-energi-fosil> (accessed Feb. 07, 2022).
- [2] R. Setiawan, “Prototipe Mobil Listrik Menggunakan Brushless Motor Dc 350 Watt,” *Repos. Univ. Negeri Jakarta*, p. 1, 2016.
- [3] I. Susanti, R. Rumiasih, C. RS, and A. Firmansyah, “Pengisiannya Pada Mobil Listrik,” *Elektra*, vol. 4, no. 2, p. 29, 2019.
- [4] “Pengendalian Motor Listrik dengan Direct Online - Jago Otomasi.” <http://jagootomasi.com/pengendalian-motor-listrik-dengan-direct-online/> (accessed Jun. 25, 2022).
- [5] “Lima poin pengujian utama untuk memahami efisiensi dan performa penggerak motor | Fluke.” <https://www.fluke.com/id-id/pelajari/blog/motor-drive-pompa-kompresor/5-poin-pengujian-efisiensi-penggerak-motor> (accessed Jun. 25, 2022).
- [6] P. B. Perdana and I. N. Sutantra, “Analisa Penggunaan Regenerative Brake pada Mobil Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik,” *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.29591.
- [7] Indonesia, “Regulation of the Minister of Transportation on Testing of Physical Types of Motorized Vehicles with Motor Propulsion Using Electric Motors,” *Regul. Minist. Transp. Number PM 44 Year 2020*, no. 3, 2020.
- [8] D. Akbar and S. Riyadi, “Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless Dc (Blde) Menggunakan Pwm (Pulse Width Modulation),” *Semin. Nas. Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi*, pp. 255–262, 2019, doi: 10.5614/sniko.2018.30.
- [9] N. Redha Arsyah, H. Suryatmojo, and S. Anam, “Desain Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Berbasis *Power Factor Correction* (PFC) Menggunakan *Single Ended Primary Inductance Converter* (SEPIC),” *Repos. Inst. Teknol. Surabaya*, pp. 1–6, 2016.
- [10] O. Basovych, “3-Phase Brushless DC Motor Control with Hall Sensors,” *Allaboutcircuits*, 2018.

LAMPIRAN – LAMPIRAN

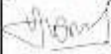
- *Logbook* Kegiatan Selama Proses Tugas Akhir 2
- Dokumen TA201 dan TA202



Capstone Design
2021 – 2022

TECHNICAL REPORT

IDENTITAS

Dokumentasi Proses	TA201
Topik / Judul Capstone Design	Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putar Motor BLDC dan Rem Regeneratif untuk Kendaraan Motor Listrik
Nama Lengkap	Muhammad Rais
No. Induk Mahasiswa (NIM)	17524019
Dosen Pembimbing 1	Dwi Ana Ratna Wati, S.T., M.Eng.
Dosen Pembimbing 2	 Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.

Spesifikasi Sistem

<u>Controller BLDC</u> Daya : 1000 watt Tegangan input : 48 V Sensor input : hall effect sensor Throttle input : 0 - 5 V Max Current : 40 A Waterproof grade : IP67
<u>Rem regeneratif</u> jenis : MPPT wind turbine controller Daya : 800 Watt Output voltage: 48 V Waterproof grade : IP67
<u>Switching System:</u> Relay 3 channel Max current : 30 A Rated voltage : 30 V

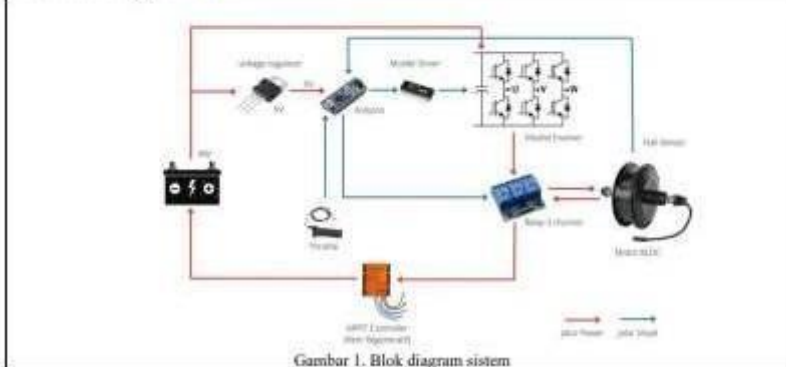




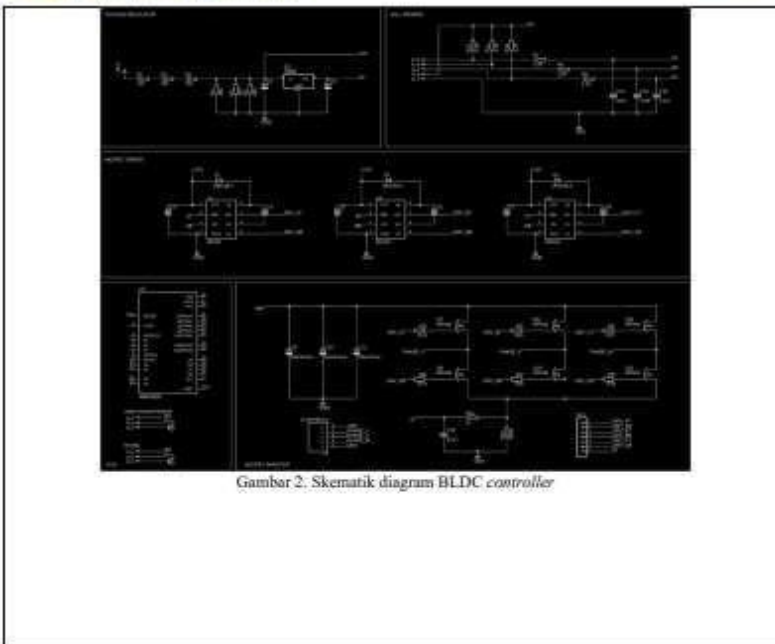
Micro controller : arduino nano
Sensor input : throttle
potensiometer Voltage input : 12V

Kompatibel untuk semua sepeda
Sistem kendali yang dirancang terdapat indikator untuk memonitor kecepatan kendaraan, kapasitas baterai, dan indicator controller yang sedang aktif.
Sistem kendali dirancang memiliki ketahanan terhadap siraman air.

Desain rancangan awal

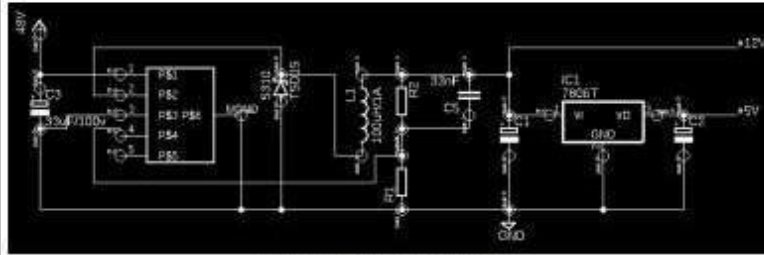


Gambar 1. Blok diagram sistem



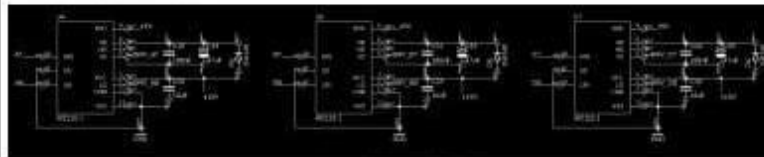
Gambar 2. Skematik diagram BLDC controller

Desain rancangan akhir



Gambar 1. Blok voltage regulator

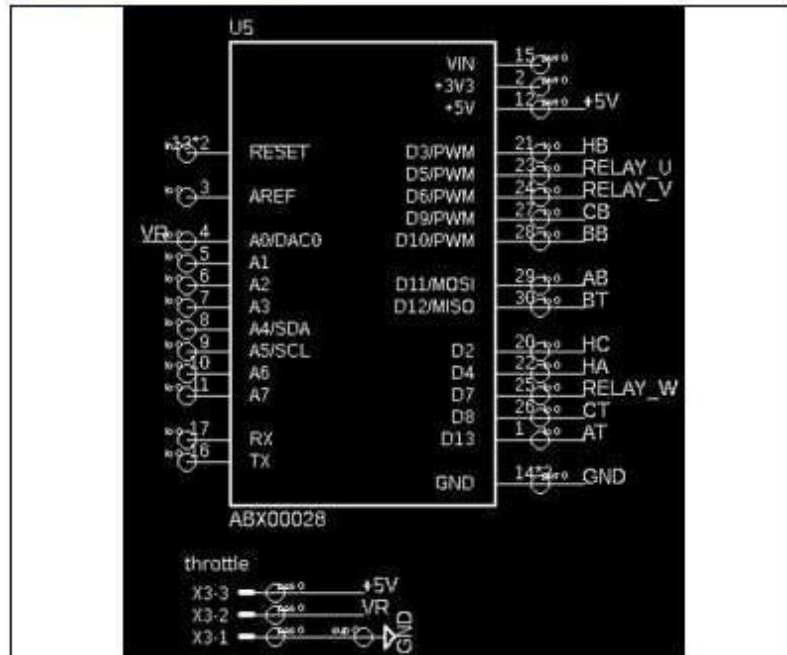
Untuk meregulasi tegangan input, diperlukan 2 ic yang akan meregulasi tegangan 48v menjadi 12v dan 5v. ic buck converter XL7015 berfungsi untuk mengubah tegangan 48V menjadi 12V dengan mengatur parameter pada resistor 1 dan resistor 2. sedangkan untuk meregulasi tegangan menjadi 5V dibutuhkan ic lm7805.



Gambar 2. Blok Mosfet driver

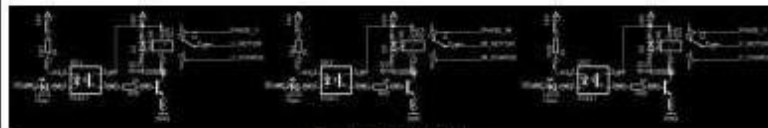
terdapat perubahan ic yang digunakan untuk rangkaian mosfet driver, yang dimana awalnya memakai ic irf2101 menjadi irf2110. hal ini dikarenakan terdapat penambahan mosfet yang awalnya hanya menggunakan 1 mosfet per sub fasa menjadi 2 mosfet diparalel per sub fasa.





Gambar 3. Blok Controller

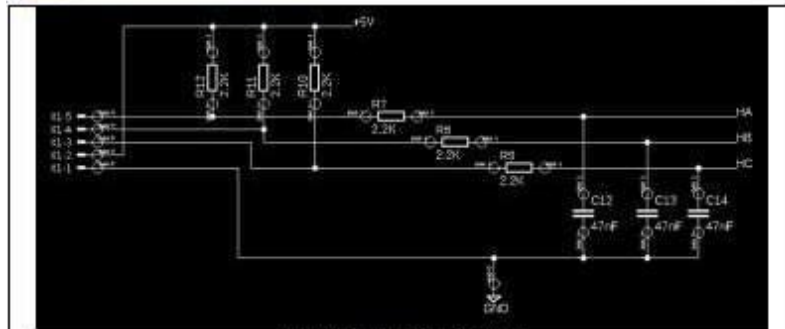
controller yang digunakan untuk rangkaian ini adalah arduino nano. controller digunakan sebagai penyimpan data komutasi yang dijadikan acuan mendrive mosfet sesuai feedback yang diberikan oleh hall sensor. selain itu, controller juga digunakan sebagai pembaca arus dan pemroses sinyal input dari throttle.



Gambar 4. Blok Relay

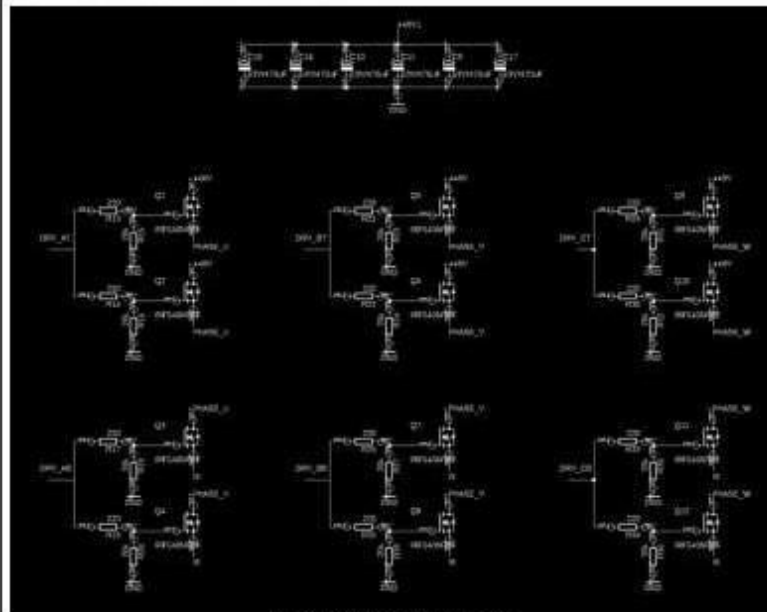
blok relay digunakan untuk menswitch antara controller motor dengan controller generator sesuai kondisi motor BLDC.





Gambar 5. Blok filter hall sensor

blok filter hall sensor digunakan untuk memperkecil ripple dari sinyal yang dikirimkan oleh hal sensor dan akan diproses oleh blok controller.



Gambar 7. Blok power mosfet





Block power mosfet adalah blok yang berfungsi untuk mengubah sinyal DC menjadi sinyal AC 3 fasa (inverter). Terdapat perubahan skematik pada blok ini jika dibanding dengan blok sebelumnya berupa penambahan 1 mosfet yang diparalel di tiap-tiap sub fasanya. hal ini dikarenakan terdapat perubahan maksimum arus yang awalnya 20A menjadi 40A. selain itu, terdapat penambahan resistor pull down untuk membuang muatan listrik pada mosfet saat sinyal berada pada posisi off.



Production Costs					
No	Nama Barang	Jumlah	Satuan	Harga	Total
1	t-blok 2 pin	1	pcs	Rp550	Rp550
2	modul buck conv x17015	1	pcs	Rp30,000	Rp30,000
3	flux solder	1	pcs	Rp30,000	Rp30,000
4	capacitor 470uF 25v	3	pcs	Rp1,500	Rp4,500
5	IC LM 7805	1	pcs	Rp1,300	Rp1,300
6	resistor 2.2k ohm	6	pcs	Rp400	Rp2,400
7	capacitor 47nF	3	pcs	Rp200	Rp600
8	ir 2110	3	pcs	Rp25,000	Rp75,000
9	dioda 1n4148	6	pcs	Rp100	Rp600
10	capacitor 1uF	6	pcs	Rp400	Rp2,400
11	Arduino nano	1	pcs	Rp75,000	Rp75,000
12	t-blok 3pin	2	pcs	Rp5,000	Rp10,000
13	pin header	2	pcs	Rp1,000	Rp2,000
14	t-blok 5 pin	1	pcs	Rp10,600	Rp10,600
15	capacitor 63v/470uF	5	pcs	Rp1,500	Rp7,500
16	resistor 220 ohm	6	pcs	Rp100	Rp600
17	mosfet irf540n	12	pcs	Rp25,000	Rp300,000
18	resistor 1k ohm	2	pcs	Rp100	Rp200
19	capacitor 47nF	1	pcs	Rp300	Rp300
20	modul sensor arus	1	pcs	Rp25,000	Rp25,000
21	timah solder	1	meter	Rp4,000	Rp4,000
22	kabel jumper	1	pack	Rp30,000	Rp30,000
23	box instrument	1	pcs	Rp157,000	Rp157,000
24	jasa cetak pcb	2	pcs	Rp80,000	Rp160,000
25	kabel awg 16	3	meter	Rp4,000	Rp12,000
26	modul relay 3 channel	1	pcs	Rp154,000	Rp154,000
27	modul mppt	1	pcs	Rp555,000	Rp555,000



	controller				
28	jasa ekspedisi pengiriman	10	jml pengiriman	Rp15,000	Rp150,000
	jumlah				Rp1,800,550

Logs / Catatan Aktivitas (meliputi perencanaan, aktivitas/tugas, dan capaiannya)

Perencanaan

Pada tahap ini kami merencanakan untuk menyelesaikan rangkaian nya dan desain pcb nya berdasarkan hasil studi literatur dan berdiskusi dengan dosen serta berdiskusi dengan pegiat sistem kendali. Hal ini bertujuan untuk mendukung rangkaian yang kami buat. adapun hal-hal yang kami lakukan adalah sebagai berikut.

1. Melakukan studi literatur terkait hal-hal yang bersangkutan dengan topik kami
2. Melakukan diskusi dengan dosen dan pegiat sistem kendali terkait solusi dari rangkaian kami
3. Melakukan pengujian rangkaian di laboratorium

Aktivitas

Aktivitas dilaksanakan dengan mengeksekusi setiap perencanaan yang kami buat meliputi studi literatur, diskusi dengan dosen dan pegiat sistem kendali, serta melakukan berbagai pengujian terhadap rangkaian kami

Capaian

Pada TA201, kami telah melakukan beberapa hal yaitu:

1. Melakukan studi literatur terkait hal-hal yang bersangkutan dengan topik kami
2. Melakukan diskusi dengan dosen dan pegiat sistem kendali terkait solusi dari rangkaian kami
3. Melakukan pengujian rangkaian di laboratorium

Berdasarkan perencanaan dan aktivitas yang telah kami lakukan maka ada capaian-capaian yang telah kami peroleh pada setiap prosesnya. capaian-capaiannya dapat dilihat pada tabel berikut:

No.	Proses yang telah dilakukan	Capaian
1.	Melakukan studi literatur terkait hal-hal yang bersangkutan dengan topik kami	<ul style="list-style-type: none"> • Melakukan revisi pada spesifikasi sistem pada maksimum arus controller. BLDC





		<ul style="list-style-type: none"> Melakukan revisi pada desain rangkaian
2.	Melakukan diskusi dengan dosen dan pegiat sistem kendali terkait solusi dari rangkaian kami	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan revisi pada desain rangkaian Memfinalisasi nilai pada setiap komponen sehingga nanti outputnya sesuai seperti yang diharapkan
3.	Melakukan pengujian rangkaian di laboratorium	<ul style="list-style-type: none"> kendala yang terjadi sebelumnya sudah teratasi Memutuskan untuk mencetak PCB sehingga rangkaian kami lebih simpel pada saat pengujian

Catatan tambahan

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Sertakan dokumen/bukti-bukti pendukung dari deskripsi/penjelasan laporan ini (jika ada)

- TA202

<p>Metode / Rancangan Pengujian Sistem</p> <p>Metode / Rancangan Pengujian Sistem.</p> <p>Sebelum melakukan pengujian adapun langkah-langkah yang harus dilakukan supaya pengujian sistem akan berhasil. diantaranya adalah sebagai berikut:</p> <ol style="list-style-type: none"> Mengecek tegangan yang keluar dari regulator 12V, 5V, dan 3.3V Pengujian nilai output sinyal PWM dengan 10 macam nilai <i>Duty Cycle</i> Mengecek rangkaian <i>Bootstrap</i> pada driver MOSFET Mengecek sinyal keluaran hall sensor saat motor diputar secara manual pengujian logika output digital komutasi 6 langkah Mengecek sinyal fasa ke ground saat rangkaian sudah menggunakan komutasi 6 langkah pengujian konsumsi arus dan nilai RPM pada 10 variasi nilai <i>duty cycle</i> pengujian konsumsi arus dan nilai RPM pada 10 variasi nilai <i>duty cycle</i> dan 3 variasi beban pengendara

Metode Pengukuran untuk pengujian Sistem

Dari ke empat metode pengujian sistem diatas, masing-masing metode pengujian sistem memiliki metode pengukuran yang berbeda-beda. berikut adalah metode pengukuran dari masing-masing metode pengujian sistem:

- a. Pengujian tegangan regulator 12V, 5V, dan 3.3V dilakukan dengan menggunakan Multimeter yang dihubungkan dengan masing-masing output regulator.
- b. Pengujian nilai output sinyal PWM dilakukan dengan memvariasikan nilai duty cycle sebanyak sepuluh variasi, mulai dari 10% hingga 100%. dari masing-masing variasi tersebut dilakukan pengukuran tegangan output pada pin digital yang digunakan dengan menggunakan multimeter.
- c. Pengujian rangkaian Bootstrap MOSFET *driver* dilakukan dengan memberi dua input sinyal PWM (*High side* dan *Low side*) dengan *Deadtime* selama 1 ms pada rangkaian *Bootstrap* kemudian pemberian supply tegangan utama (48V) pada drain MOSFET *high side* dan ground pada *source* MOSFET *low side*. Kemudian dilakukan pengecekan sinyal PWM keluaran dari rangkaian *bootstrap*. Rangkaian *bootstrap* yang berhasil adalah rangkaian yang nilai amplitudo dari sinyal PWM nya mengalami peningkatan sesuai dari nilai *source* yang didapatkan dan tidak terdapat *short* pada sinyal PWM *high side* dan sinyal PWM *low side* yang dapat terjadi jika kondisi *high side* dan *low side* aktif secara bersamaan. Indikator bahwa tidak terdapat *short* pada sinyal PWM *high side* dan sinyal PWM *low side* adalah tidak ada arus yang mengalir pada supply tegangan utama sehingga MOSFET tidak panas.
- d. Pengecekan *hall sensor* dilakukan dengan menghubungkan kabel *hall sensor* pada motor dengan rangkaian penguat tegangan yang telah dirancang, kemudian sinyal output penguatan tegangan pada rangkaian penguat dihubungkan ke osiloskop untuk melihat bentuk serta pola sinyal keluarannya.
- e. Pengujian logika komutasi 6 langkah dilakukan dengan cara menguji enam pin digital yang akan dihubungkan dengan rangkaian inverter saat *microcontroller* mendapatkan input dari *hall sensor*. Pola *hall sensor* akan menentukan pola output digital dari 6 pin digital yang terhubung pada rangkaian inverter
- f. Pengujian respon sinyal output fasa ke ground dilakukan apabila keempat sistem diatas telah terpenuhi. Pengujian ini dilakukan dengan menghubungkan *hall sensor* pada motor ke perangkat *controller*, kemudian hubungkan probe osiloskop pada kabel fasa *controller* dan putar motor secara manual. kemudian sinyal respon dari *controller* akan ditampilkan pada layar osiloskop.
- g. Pengujian konsumsi arus dan nilai RPM dilakukan dengan memberi input sepuluh variasi nilai *duty cycle* serta tiga variasi kondisi persentase kapasitas daya pada baterai pada perangkat





controller yang sudah melewati lima pengujian sebelumnya, kemudian dilakukan pengukuran nilai arus yang terhubung dengan motor dan nilai RPM dari putaran motor.

- h. Pengujian konsumsi arus dan kecepatan kendaraan dilakukan dengan memberi input sepuluh variasi nilai *duty cycle*, tiga variasi kondisi persentase energi pada baterai, serta tiga variasi beban pengendara pada perangkat *controller* yang sudah terinstal pada kendaraan listrik, kemudian dilakukan pengukuran nilai arus yang terhubung dengan motor serta kecepatan kendaraan.

Hasil Pengujian Sistem

Pengujian tegangan regulator

No	Vout (volt)	
	hasil perhitungan	hasil pengukuran
1.	12 V	11.93 V
2.	5 V	4.95 V
3.	3.3 V	3.29 V

pengujian nilai PWM

Pengujian ke-	Vin (Volt)	Duty Cycle PWM (%)	Vout (Volt)	
			Hasil pengukuran	Hasil perhitungan
1	5	10		0.5



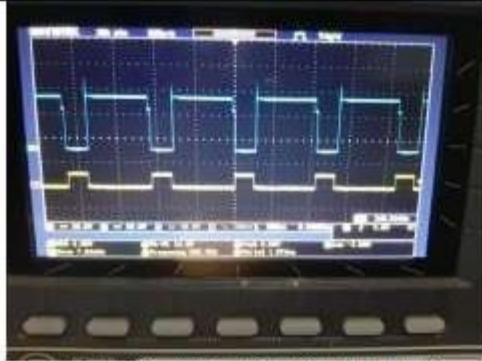
2		20		1
3		30		1.5
4		40		2
5		50		2.5
6		60		3
7		70		3.5
8		80		4
9		90		4.5
10		100		5

pengujian Bootstrap gate driver:



Gambar 1. Pengujian gate driver half bridge 1





Gambar 2. Pengujian gate driver half bridge 2



Gambar 3. Pengujian gate driver half bridge 3





Gambar 4. Supply tegangan Bootstrap dan tegangan utama rangkaian half bridge

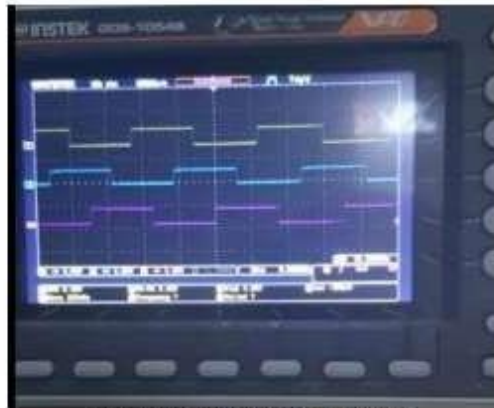
Pada gambar 1, gambar 2, dan gambar 3, dapat dilihat bahwa rangkaian bootstrap sudah bekerja sesuai dengan desain yang dirancang, dimana pada ketiga pengujian rangkaian half bridge tersebut dapat dilihat pada sinyal PWM bagian high side memiliki amplitude lebih tinggi dibandingkan bagian low side dan kedua sinyal tersebut sudah mengalami kenaikan amplitudo. kemudian pada gambar 4, supply tegangan channel 2 berfungsi untuk mensupply tegangan bootstrap, dan dapat dilihat konsumsi arusnya sebesar 0.029A, dan supply channel 1 berfungsi sebagai supply utama dari rangkaian half bridge, dan arusnya bernilai 0 yang membuktikan bahwa tidak terjadi short pada tiap-tiap rangkaian half bridge.

pengujian hall sensor:





gambar 5. pemutaran motor secara manual dengan tangan



gambar 6. sinyal keluaran hall sensor

pada gambar 5, motor diputar secara manual dengan tangan untuk memberikan impuls hall sensor pada motor, kemudian pada gambar 6, dapat dilihat sinyal keluaran hall sensor yang sudah





dinaikkan amplitudanya menggunakan pull-up resistor menjadi 3.3v. dan dari ketiga sinyal keluaran tersebut terbentuk pola jarak antar sinyal sebesar 120 derajat mekanik.

pengujian komutasi 6 langkah :

Dir	HALL (A)	HALL (B)	HALL (C)	Q1		Q2		Q3		Q4		Q5		Q6		KESIMPULAN
				T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	
1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	Benar
1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	Benar
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	Benar
1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	Benar
1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	Benar
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	Benar
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	Benar
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	Benar
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	Benar
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	Benar
0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	Benar
0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	Benar

Pengujian sinyal fasa ke ground

pengujian duty cycle rpm arus



Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Kontroler Motor BLDC

No.	Duty Cycle (%)	Arus (A)	Putaran Motor (rpm)
1.	10	0.36	59
2.	20	0.47	101
3.	30	0.55	138
4.	40	0.62	173
5.	50	0.68	203
6.	60	0.74	252
7.	70	0.81	294
8.	80	0.84	304
9.	90	0.91	319
10.	100	0.94	324

No.	Duty Cycle	Arus (A)	Putaran motor (RPM)
1.	10%		
2.	20%		
3.	30%		
4.	40%		
5.	50%		
6.	60%		
7.	70%		
8.	80%		
9.	90%		
10.	100%		



Logs / Catatan Aktivitas (meliputi perencanaan, aktivitas/tugas, dan capaiannya)

Perencanaan:

Pada tahap perencanaan ini kami merencanakan untuk melakukan pengujian dan menyelesaikan proses tahap akhir pada alat kami. hal tersebut meliputi:

1. melakukan pengecekan tegangan regulator
2. melakukan pengujian nilai output sinyal PWM dengan 10 duty cycle
3. melakukan pengecekan rangkaian bootstrap pada driver MOSFET
4. Mengecek sinyal keluaran hall sensor saat motor diputar secara manual
5. pengujian logika output digital komutasi 6 langkah
6. Mengecek sinyal fasa ke ground saat rangkaian sudah menggunakan komutasi 6 langkah
7. pengujian konsumsi arus dan nilai RPM pada 10 variasi nilai duty cycle
8. pengujian konsumsi arus dan nilai RPM pada 10 variasi nilai duty cycle dan 3 variasi beban pengendara

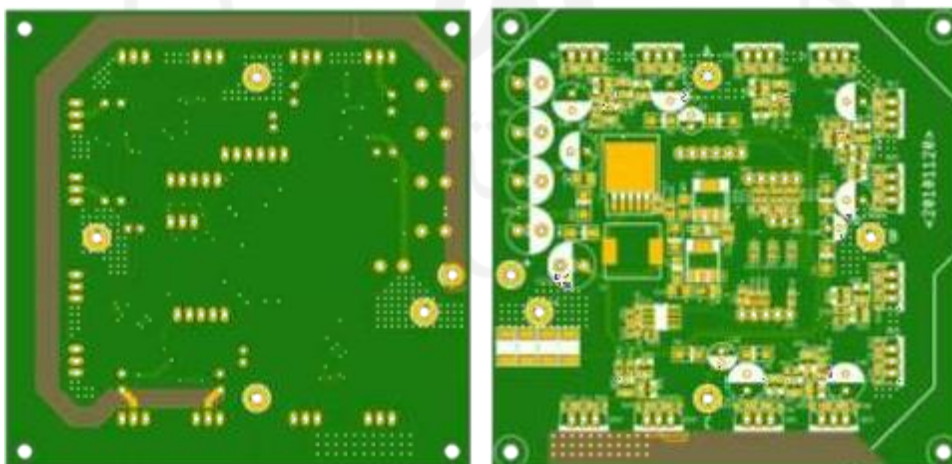
Aktivitasi:

Pada tahap ini dilakukan dengan cara mengeksekusi setiap perencanaan yang telah kami buat. pada eksekusinya , setiap tahap harus dilakukan secara urut karena berguna untuk meminimalisir kesalahan yang akan terjadi pada tahap lanjutnya. Terdapat beberapa kendala pada saat melaksanakan tahap yang ke 7 dan yang ke 8 sehingga waktu pengujian menjadi mundur.

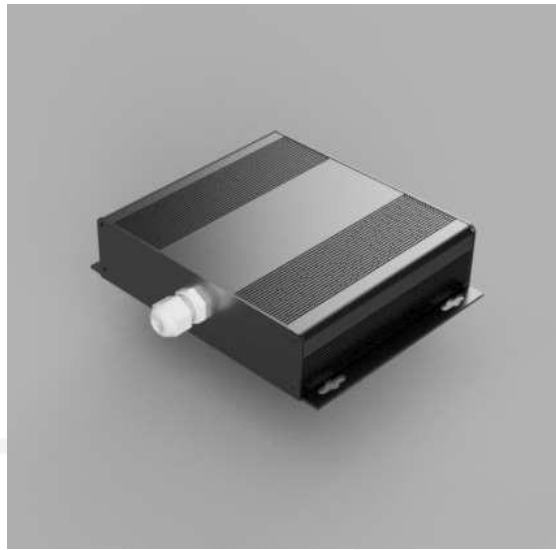
Capaian:

Pada tahap ini capaiannya yaitu mulai dari tahap 1 sampai ke tahap 6 sudah dilakukan pengujianya dan berhasil, karena jika satu tahap tidak berhasil maka tidak bisa melakukan pengujian pada tahap selanjutnya. untuk tahap ke 7 dan tahap ke 8 masih terdapat kendala pada pengujianya sehingga waktu pengerjaan TA menjadi mundur.

Catatan tambahan



Desain PCB rangkaian



Desain *box* instrument



Tampak luar produk IMCO



Tampak dalam produk IMCO

No	Tanggal Pembelian	Deskripsi Barang	Jumlah
1.	20 Mei 2022	Flux amtech	Rp 7.500,-
2.		Kabel 1x0.6 federal kuning intercom	Rp 5.000,-
3.		T Blok kecil 2 pin biru/hijau	Rp 13.500,-
4.		Soket IC 14pin	Rp 3.000,-
5.		Elco 47/16	Rp 1.500,-
6.		Elco 10/16	Rp 1.500,-
7.		CK 100k	Rp 1.500,-
8.		Dioda IN4148	Rp 2.250,-
9.		R1/4W 220R	Rp 1.125,-
10.	23 Mei 2022	DC to DC step down LM2596 3A	Rp 12.000,-
11.		ACS712 modul sensor arus ACS712ELCTR-30A range 30 A	Rp 25.000,-
12.	14 Juni 2022	Black connector 40pin	Rp 7.000,-
13.		Soket IC 14pin	Rp 5.250,-
14.		Elco 47/160	Rp 5.000,-
15.		CM 100n	Rp 3.250,-
16.		CM 47n	Rp 5.000,-
17.		CK 100k	Rp 1.500,-
18.		Elco 100/16	Rp 400,-
19.		Dioda IN4007	Rp 4.000,-
20.		R1/4W 22R	Rp 1.875,-
21.		R1/4W	Rp 1.125,-
22.	4 Juni 2022	Transistor IRF540N IRF540 33A 100V to-220 power MOSFET original	Rp 94.500,-
23.	12 April 2022	IC IR2110 IR 2110 original	Rp 108.600,-
24.	26 April 2022	STM32F103C8T6 ARM STM32 minimum system development board module	Rp 90.000,-
25.		ST-Link V2 stlink mini STM8 STM32 STLINK downloader programming	Rp 67.000,-

26.		Biaya ongkir	Rp 10.900,-
27.	15 Mei 2022	Jasa cetak PCB satuan – tanpa masking	Rp 88.500,-
28.	26 Mei 2022	LM2596HVS LM2596HV <i>high voltage</i> DC stepdown adjustable 4.5-60v DC buck	Rp 39.300,-
29.	4 Juni 2022	<i>Box</i> electronic instrument aluminium HF39# silver 48x160x180/205mm	Rp 248.300,-
30.	15 Juni 2022	Arduino nano CH340/PL2303 IC	Rp 125.000,-
31.		18k ohm ¼ watt carbon film resistor	Rp 500,-
32.		Kabel mini USB 30 cm	Rp 8.000,-
33.	15 Juni 2022	Jasa cetak PCB	Rp 237.000,-
TOTAL			Rp 1.225.875,-

