



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN METODE *PULSE AMPLITUDE
MODULATION (PAM)***

Rifky Wahyuda
NRP 07111440000150

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
Danar Fahmi S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONTROL MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN METODE *PULSE AMPLITUDE
MODULATION (PAM)***

Rifky Wahyuda
NRP 07111440000150

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
Danar Fahmi S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

Design and Implementation of BLDC Motor using Pulse Amplitude Modulation (PAM) Control

Rifky Wahyuda
NRP 07111440000150

Supervisors

Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
Daniar Fahmi S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

Desain dan Implementasi Kontrol Motor BLDC Menggunakan Metode Pulse Amplitude Modulation (PAM)

TUGAS AKHIR

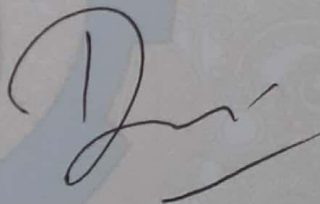
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
NIP. 198006032006041003

Daniar Fahmi S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



Halaman ini sengaja dikosongkan

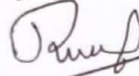
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan “**Desain dan Implementasi Kontrol Motor BLDC menggunakan metode Pulse Amplitude Modulation (PAM)**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 11 December 2019



~~Rifky Wahyuda~~

NRP 07111440000150

Halaman ini sengaja dikosongkan

Desain dan Implementasi Kontrol Motor BLDC Menggunakan Metode Pulse Amplitude Modulation (PAM)

Nama Mahasiswa : Rifky Wahyuda
NRP : 07111440000150
Pembimbing I : Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
NIP : 198006032006041003
Pembimbing II : Daniar Fahmi S.T., M.T.
NIP : 198909252014041002

Abstrak:

Motor *brushless* DC pada era sekarang sudah banyak diaplikasikan pada motor listrik berskala rumah tangga maupun industri. Motor BLDC banyak dipilih karena memiliki efisiensi, kepadatan daya, dan torsi yang baik. Dari segi fisik juga motor BLDC memiliki dimensi yang lebih kecil dibanding jenis motor lain dengan daya yang sama. Tidak hanya merambah di peralatan rumah tangga dan industri, motor BLDC khususnya motor listrik juga mulai merambah di sektor otomotif. Bahkan di prediksi beberapa tahun kedepan mayoritas industri otomotif akan menggeser motor konvensional ke motor elektrik. Kontroler yang digunakan pada motor BLDC pada umumnya menggunakan metode PWM, sedangkan pada tugas akhir ini akan diimplementasikan menggunakan kontroler *Pulse Amplitude Modulation* (PAM). Metode PWM inverter output tegangan inverter tidak murni *six-step*, selain itu juga menimbulkan *ripple* arus pada motor dan berlanjut menimbulkan ripple torsi pada motor BLDC. Tugas akhir dengan studi sistem tenaga ini menggunakan metode *Pulse Amplitude Modulation* dengan menambahkan *buck converter* sebagai input dari inverter 3 fasa. Metode PAM ini dapat mengurangi *ripple* arus pada motor BLDC sehingga torsi yang didapatkan lebih stabil.

Kata kunci: BLDC motor, Controller motor, Pulse Amplitude Modulation (PAM).

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Design and Implementation of BLDC Motor using Pulse Amplitude Modulation (PAM) Control

Student Name : Rifky Wahyuda
Supervisor I : Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D
Supervisor II : Daniar Fahmi S.T., M.T.

Abstract:

BLDC motors now era have been widely applied to household and industrial-scale electric motors. BLDC motors were chosen because they have good efficiency, power density and torque. From the physical side also BLDC motors have smaller dimensions compared to other types of motors with the same power. Not only penetrated in household appliances and industry, BLDC motors, especially electric motors also began to penetrate in the automotive sector. Even predicted in the next few years the majority of the automotive industry will use an electric motor to shift conventional motors. The controller used in BLDC motors generally uses the PWM method, whereas in this final project will be implemented using a Pulse Amplitude Modulation (PAM) controller. PWM method of inverter output voltage is not pure six-step inverter, but it also causes a current ripple on the motor and continues to cause torsional ripple on the BLDC motor. This final project uses Pulse Amplitude Modulation by adding a buck converter as input from the 3 phase inverter. PAM method can reduce the current ripple on the BLDC motor so that the torque obtained is more stable.

Keywords :BLDC motor, Controller motor, Pulse Amplitude Modulation (PAM).

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

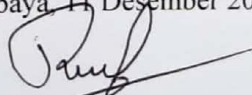
Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul "**Desain dan Implementasi Kontrol Motor BLDC menggunakan metode Pulse Amplitude Modulation (PAM)**".

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D dan Bapak Daniar Fahmi S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman seperjuangan yang telah menemani dan memberikan dukungan hingga penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat untuk kedepannya.

Surabaya, 11 Desember 2019



Rifky Wahyuda

NRP 07111440000150

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 SPEED KONTROL BLDC DENGAN METODE PULSE AMPTUDE MODULATION	5
1.8 Motor BLDC	5
1.8.1 Pengendalian Motor BLDC dengan Metode <i>Pulse Amplitude Modulation</i> (PAM)	7
1.9 Buck Konverter	9
1.10 Inverter 3 Fasa.....	12
BAB 3 PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT	17
3.1. Block Diagram Sistem	17
3.2. Perencanaan dan Pembuatan Rangkaian <i>Hall Effect Sensor</i>	18

3.3.	Perencanaan dan Pembuatan <i>Buck Converter Constant Voltage</i>	18
3.3.1	Penghitungan Parameter <i>Buck converter</i>	19
3.3.2	Pembuatan driver mosfet <i>Buck Converter</i>	24
3.3.3	Pembuatan Sensor Tegangan <i>Buck Converter</i>	24
3.4	Perencanaan dan Pembuatan Inverter	25
3.5	Perencanaan Pengcodingan Arduino	29
BAB 4	PENGUJIAN DAN ANALISA	33
3.6	Metode Pengujian	33
3.7	Pengujian Parsial	33
3.7.1	Pengujian Sinyal Six Step pada <i>Mikrokontroller</i>	33
3.7.2	Pengujian Inveter 3 fasa	34
3.7.3	Pengujian <i>Buck Converter</i>	43
3.7.4	Pengujian <i>Hall Of Sensor</i> Motor BLDC	46
3.8	Pengujian Integrasi Sistem.....	50
3.8.1	Integrasi Sistem Simulasi.....	50
3.8.2	Integrasi Sistem Alat.....	56
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	61
3.9	Kesimpulan	61
3.10	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65
BIODATA PENULIS	67

DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar 2. 1 Struktur dari BLDC motors</i>	<i>6</i>
<i>Gambar 2. 2 Sinyal Hall Sensor dan sinyal commutation untuk putaran CW</i>	<i>7</i>
<i>Gambar 2. 3 Sinyal Switching mosfet (S1-S6) inverter 3 phase dengan Metode PAM</i>	<i>8</i>
<i>Gambar 2. 4 Tegangan output dari line-line inverter 3 phase dengan Metode PAM</i>	<i>9</i>
<i>Gambar 2. 5 Buck Converter standart circuit.....</i>	<i>9</i>
<i>Gambar 2. 6 Buck Converter closed condition.....</i>	<i>10</i>
<i>Gambar 2. 7 Buck Converter open condition</i>	<i>11</i>
<i>Gambar 2. 8 Inverter 3 phase Circuit.....</i>	<i>12</i>
<i>Gambar 2. 9 Commutation phase 120⁰.....</i>	<i>13</i>
<i>Gambar 3. 1 Diagram block system.....</i>	<i>17</i>
<i>Gambar 3. 2 Rangkaian Buck Converter</i>	<i>19</i>
<i>Gambar 3. 3 simulasi Buck Converter open loop</i>	<i>21</i>
<i>Gambar 3. 4 Gelombang tegangan dan arus output dari buck converter</i>	<i>21</i>
<i>Gambar 3. 5 Nilai RMS value dari simulasi buck converter</i>	<i>22</i>
<i>Gambar 3. 6 buck converter constant voltage</i>	<i>23</i>
<i>Gambar 3. 7 Hasil simulasi PSIM dari buck converter constant voltage.....</i>	<i>23</i>
<i>Gambar 3. 8 Optocoupler circuit dengan IC TLP521</i>	<i>24</i>
<i>Gambar 3. 9 Konfigurasi pin TLP 521</i>	<i>26</i>
<i>Gambar 3. 10 Driver mosfet IR 2110 circuit</i>	<i>26</i>
<i>Gambar 3. 11 Inverter 3 phase simulation dengan PSIM.....</i>	<i>27</i>
<i>Gambar 3. 12 Sinyal Switching dari S1-S6 inverter 3 fasa</i>	<i>27</i>
<i>Gambar 3. 13 Sinyal tegangan output line to line inverter 3 phase</i>	<i>28</i>
<i>Gambar 3. 14 Sinyal tegangan output line to neutral inverter 3 phase</i>	<i>29</i>
<i>Gambar 3. 15 Block Diagram kontrol arduino</i>	<i>30</i>
<i>Gambar 4. 1 Sinyal Six-Step Commutation 120⁰ S1 (blue), S2 (purple), S3 (orange).....</i>	<i>34</i>
<i>Gambar 4. 2 Desain Controller of inverter 3 phase</i>	<i>35</i>
<i>Gambar 4. 3 Kondisi HIGH dan LOW dari IC IR2110</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 4. 4 Inverter 3 phase circuit</i>	<i>37</i>
<i>Gambar 4. 5 Kondisi tegangan dari gate mosfet</i>	<i>38</i>

<i>Gambar 4. 6 Kenaikan tegangan gate mosfet dikarenakan kenaikan tegangan drain mosfet</i>	<i>39</i>
<i>Gambar 4. 7 Tegangan Output dari Line to Neutral Inverter 3 phase</i>	<i>41</i>
<i>Gambar 4. 8 Sinyal Tegangan line to line inverter 3 phase</i>	<i>42</i>
<i>Gambar 4. 9 Buck Converter Circuit</i>	<i>43</i>
<i>Gambar 4. 10 Buck converter PCB 2</i>	<i>44</i>
<i>Gambar 4. 11 Grafik dari output tegangan buck converter dengan perubahan duty cycle</i>	<i>46</i>
<i>Gambar 4. 12 Jalur Hall of Sensor di PCB 2</i>	<i>47</i>
<i>Gambar 4. 13 Sinyal Output dari Hall Effect Sensor</i>	<i>48</i>
<i>Gambar 4. 14 Nyala LED karena six-step komutasi hall of effect.....</i>	<i>50</i>
<i>Gambar 4. 15 Simulasi Pulse Amplitude Modulation dengan PSIM...</i>	<i>51</i>
<i>Gambar 4. 16 buck converter simulasi constant voltage dengan PSIM51</i>	<i>51</i>
<i>Gambar 4. 17 Nilai rms Vout dan V referensi dari simulasi dengan PSIM.....</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4. 18 Sinyal tegangan dari line to line inverter 3 phase simulasi PSIM</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4. 19 Current signal of inverter 3 phase simulation with PSIM.....</i>	<i>53</i>
<i>Gambar 4. 20 Simulasi Pulse Width Modulation dengan PSIM</i>	<i>54</i>
<i>Gambar 4. 21 Sinyal Tegangan line to line PWM simulasi PSIM</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4. 22 Sinyal Arus inverter 3 fasa metode PWM dengan PSIM55</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4. 23 Keseluruhan integration system</i>	<i>57</i>
<i>Gambar 4. 24 Grafik dari Tegangan Buck converter dan RPM.....</i>	<i>58</i>
<i>Gambar 4. 25 Grafik dari tegangan buck converter dan arus output .</i>	<i>59</i>
<i>Gambar 4. 26 Grafik dari Tegangan buck converter dan output daya</i>	<i>59</i>

DAFTAR TABEL

<i>Tabel 2.1 On/off switch inverter 3 phase untuk putaran CW.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabel 3. 1 AWG Wire Gauge Inductor.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabel 3. 2 Tabel Input Output dari Mikrokontroler Arduino</i>	<i>31</i>
<i>Tabel 4. 1 Hasil pengujian dari Line to Netral Inverter 3 phase</i>	<i>40</i>
<i>Tabel 4. 2 Hasil pengujian dari Line to Line inverter 3 phase</i>	<i>42</i>
<i>Tabel 4. 3 Data pengujian Buck Converter dengan beban R</i>	<i>45</i>
<i>Tabel 4. 4 Six-step menggunakan urutan commutation hall effect sensor</i>	<i>49</i>
<i>Tabel 4. 5 Data pengujian simulasi dari integrasi system menggunakan metode PAM</i>	<i>53</i>
<i>Tabel 4. 6 Data Pengujian Simulasi dari Integrasi Sistem dengan metode PWM</i>	<i>56</i>
<i>Tabel 4. 7 Data pengujian Integrasi System PAM method</i>	<i>58</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor BLDC (*Brushless DC*) adalah motor yang banyak digunakan di bidang industri, industri otomotif dan bidang-bidang lain. Motor BLDC banyak dipilih dan diaplikasikan karena yang pertama, teknologi yang digunakan berupa permanen magnet sehingga memiliki efisiensi tinggi, *power density* dan torsi yang baik untuk motor. Kedua, struktur dan fitur spesial dari motor ini disediakan dalam kontroler yang sederhana dan bentuk yang lebih kecil dan kompak jika dibandingkan dengan jenis motor lain yang mempunyai daya sama. Ketiga motor ini walaupun memiliki performa yang baik, biaya perawatannya rendah dan tahan lama dibandingkan motor konvensional.[1] Karena memang motor BLDC ini adalah gabungan dari teknologi motor DC, AC, *synchronous*, *asynchronous*, dimana kelebihan dari kedua motor ini diaplikasikan pada motor BLDC. Untuk bisa mengoperasikan motor BLDC dibutuhkan inverter tiga fasa yang berfungsi mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa. Tapi dalam pengoperasiannya inverter motor BLDC bekerja dengan switching yang dioperasikan sesuai dengan posisi rotor yang dideteksi menggunakan *Hall Effect Sensor*.[2]

Dalam pengoperasiannya terdapat banyak sekali metode seperti PWM, PAM, *Hysteresis Controller* dan *complemented controller*. Mayotitas metode yang digunakan adalah menggunakan Pulse Wave Modulation, metode ini dilakukan dengan pencacahan sinyal PWM yang digunakan untuk switching pada inverter 3 fasa menjadi beberapa pulsa yang kemudian lebar pulsa tersebut dimodulasi untuk mengubah tegangan output inverter 3 fasa sesuai dengan yang diharapkan. Pada metode PWM ini sinyal keluaran tidak berbentuk six step murni, sering kali menimbulkan noise akustik dan menimbulkan rugi-rugi switching sehingga performa motor BLDC menjadi kurang optimal.

Bila dibandingkan dengan Pulsa Amplitude Modulation, metode ini menggunakan DC-DC *converter* untuk mengatur tegangan yang masuk ke inverter. Duty cycle pada *converter* dijadikan variabel sehingga bisa diubah-ubah sesuai dengan berapa besarnya input *throttle*, sedangkan duty cycle dari inverter diatur tetap. Diharapkan metode PAM ini dapat mengurangi rugi-rugi switching pada inverter 3 fasa sehingga

berimbang kepada efisiensi yang tinggi dan dapat meningkatkan performa motor BLDC.[3]

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang pembuatan proyek akhir ini, rumusan masalah yang akan dibahas meliputi:

1. Bagaimana cara menaikkan/menurunkan kecepatan putar motor BLDC dengan metode pengaturan amplitudo tegangan?
2. Bagaimana cara membuat *buck converter* dengan tegangan output yang bervariasi?

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk

1. Mengetahui bagaimana prosedur untuk menaik/turunkan kecepatan putar motor BLDC dengan metode pengaturan amplitudo tegangan.
2. Bagaimana cara membuat *buck converter* dengan tegangan output yang bervariasi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan Brushless DC motor (BLDC).
2. Sumber tegangan yang digunakan yaitu DC source 30 V.
3. Driver motor BLDC menggunakan inverter 3 fasa yang tidak memperhatikan kualitas daya pada sisi input dan output.
4. Simulasi menggunakan PSIM.
5. Datasheet motor kurang lengkap.
6. Motor BLDC hanya dijalankan pada keadaan tidak berbeban.

1.5 Metodologi

Dalam tugas akhir ini diperlukan suatu metode untuk mendapatkan hasil yang maksimal, oleh sebab itu direncanakan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengambilan dan pengumpulan data serta memperkuat dasar teori sebagai acuan dalam menyelesaikan proyek tugas akhir. Studi literatur didapatkan dari buku, jurnal, internet dan

sumber lainnya yang berkaitan dengan pengaturan kecepatan motor BLDC, *buck converter*, dan inverter 3 fasa.

2. Perancangan sistem

Pada tahap ini akan dilakukan pengumpulan data, perhitungan dan simulasi dengan software untuk mendapatkan parameter-parameter apa saja yang dibutuhkan untuk menyusun kontroler motor. Serta bagaimana respon dari hasil simulasi sebelum dilakukan implementasi alat. Sehingga akan didapatkan desain *buck converter* dan inverter 3 fasa yang sesuai dengan output yang diinginkan.

3. Pembuatan Hardware dan Software

Setelah didapatkan desain yang sesuai dalam simulasi, selanjutnya melakukan implementasi perangkat keras (hardware) meliputi *buck converter*, inverter 3 fasa dan driver dari kedua alat tersebut. Kemudian dilanjutkan dengan pengcodengan software dalam mikrokontroler untuk dapat menjalankan *buck converter* dan inverter 3 fasa sesuai fungsinya. Pengcodengan software meliputi pembangkitan sinyal PWM dan pengaktifan mosfet pada *buck converter* dan inverter 3 fasa.

4. Integrasi dan Pengujian Sistem

Pada tahap ini dilakukan integrasi sistem dari bagian-bagian yang telah dibuat. Setelah itu dilakukan pengujian sistem yang telah terintegrasi satu sama lain dan perbaikan jika terjadi masalah (kegagalan). Pada tahap ini dilakukan juga pengambilan data-data yang dibutuhkan untuk penyusunan buku laporan tugas akhir.

5. Analisa Sistem

Setelah dilakukan uji coba dan pengambilan data, selanjutnya hasil tadi di analisa performa untuk mengetahui kelebihan dan kelemahan sistem. Hasil tadi dibandingkan juga dengan teori yang telah dilakukan didalam jurnal sehingga apabila kekurangan masih relatif besar dapat diperbaiki.

6. Pembuatan Laporan Tugas Akhir

Pada tahap ini data-data yang telah sesuai, penjelasan tentang alur pengerjaan proyek, perhitungan, sistem kerja dan komponen yang digunakan disusun kedalam bentuk laporan tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : TEORI PENUNJANG

Bab ini membahas tentang dasar teori yang dipakai dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Dasar teori ini berupa penjelasan tentang motor BLDC, *Buck Converter*, Inverter 3 fasa, pengaturan sinyal komutasi, dan hasil output dari sistem.

Bab 3 : SPEED KONTROL BLDC DENGAN METODE PULSE AMPITUDE MODULATION

Bab ini membahas tentang desain, perhitungan, komponen apa saja yang digunakan dalam penyusunan alat berdasarkan dengan teori dan simulasi.

Bab 4 : PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini membahas tentang pengujian pada alat dan simulasi, selanjutnya di analisa bagaimana hasil dari kedua data antara simulasi dan real.

Bab 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi penarikan kesimpulan dari pengujian dan pengambilan data baik dari simulasi maupun alat nyata, selanjutnya saran selama proses pembuatan tugas akhir yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan system tenaga khususnya untuk permasalahan aliran daya optimal dengan penyimpan energi yang terdistribusi pada sistem.
2. Dapat menjadi refrensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya dengan topik serupa.

BAB 2

SPEED KONTROL BLDC DENGAN METODE PULSE AMPITUDE MODULATION

1.8 Motor BLDC

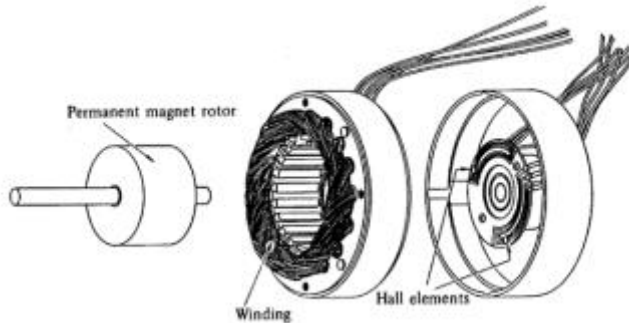
Semua motor elektrik yang tidak memerlukan koneksi elektrik (yang dibuat dengan *brush*) antara bagian stationer dan bagian berputar dapat diklasifikasikan sebagai motor brushless permanen magnet (PM). Salah satu jenis motor brushless permanen magnet yang banyak diaplikasikan pada saat ini adalah BLDC.

Brushless DC motor atau disingkat BLDC yang disebut juga dengan permanen magnet synchronous DC adalah motor listrik yang banyak dipakai karena memiliki performa dan fitur yang baik. Terdapat dua jenis motor BLDC yang dibedakan atas bentuk *back electromotive force* (Back-EMFs) yaitu BLDC dan BLAC. BLDC memiliki bentuk Back-EMFs trapezoidal sedangkan BLAC Back-EMFs nya berbentuk sinusoidal. Kedua motor ini memiliki struktur yang sama dan dikendalikan dengan kontroler inverter.[4]

Motor BLDC mempunyai banyak kelebihan dibandingkan motor konvensional seperti karakteristik torsi awal & kecepatan lebih tinggi, respon variasi lebih tinggi, efisiensi tinggi, lebih tahan lama selama dioperasikan, gangguan performa kecil, rentang kecepatan besar, biaya perawatan kecil dan kontrol motor relatif lebih sederhana dibandingkan motor induksi atau motor konvensional lainnya.

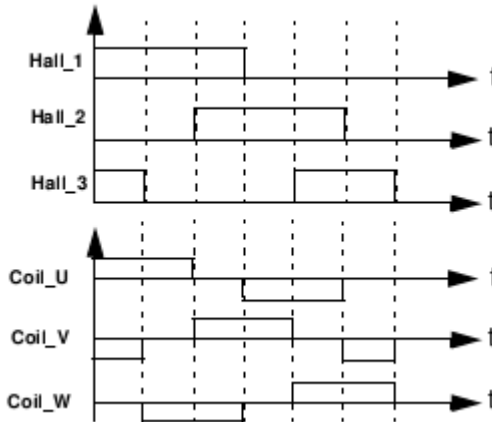
Seperti motor listrik pada umumnya, BLDC terdiri dari bagian rotor dan stator. Bagian rotor menggunakan permanen magnet, sedangkan pada bagian stator merupakan kumparan kawat yang akan memutar permanen magnet sehingga motor dapat berputar. Motor BLDC sesuai namanya menggunakan input suplai tegangan DC sebagai sumber energi motor. Selanjutnya masuk ke dalam kontroler motor yang salah satu bagiannya adalah inverter 3 fasa. Tujuan dari inverter ini adalah untuk menciptakan medan magnet putar yang dihubungkan ke stator, yang selanjutnya medan putar ini dapat menarik magnet sehingga motor dapat berputar sesuai medan putar dari inverter 3 fasa. Karena tidak adanya brush dalam motor BLDC, maka dalam penentuan medan putarnya dibutuhkan *timing* yang didasarkan pada letak permanen

magnet didalam motor.[5] Letak permanen magnet ini diketahui dengan hall sensor yang ada di dalam motor, sehingga medan putar yang di berikan dari inverter 3 fasa dapat sesuai dengan letak permanen magnetnya.



Gambar 0.1 Struktur dari *BLDC Motor* [6]

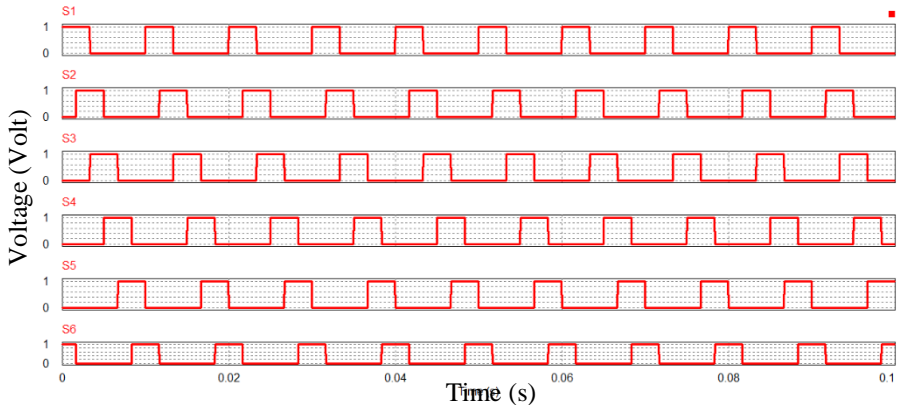
Pada gambar 2.1 terlihat bagaimana struktur dari motor BLDC secara umum. Peran hall of sensor inilah yang memberi tahu dimana letak permanen magnet di dalam motor. Selanjutnya diolah oleh *mikrokontroller* yang akan mengatur switch 3 fasa yang akan berdampak pada munculnya medan magnet pada winding untuk dapat memutar permanen magnet. Skema antara hall of sensor dan pemberian tegangan pada winding motor diilustrasikan pada gambar 2.2. Pada gambar terlihat setiap posisi permanen magnet yang ditandai dengan munculnya tegangan pada hall of sensor akan memberikan 6 kombinasi keadaan yang berbeda antara winding U, wingding V dan winding W. Skema gambar 2.2 hanya berlaku untuk motor yang berputar searah jarum jam. Jika berlawanan arah jarum jam maka kombinasi setiap winding akan berbeda.



Gambar 0.2 Sinyal *Hall Sensor* dan sinyal *commutation* untuk putaran *CW* [7]

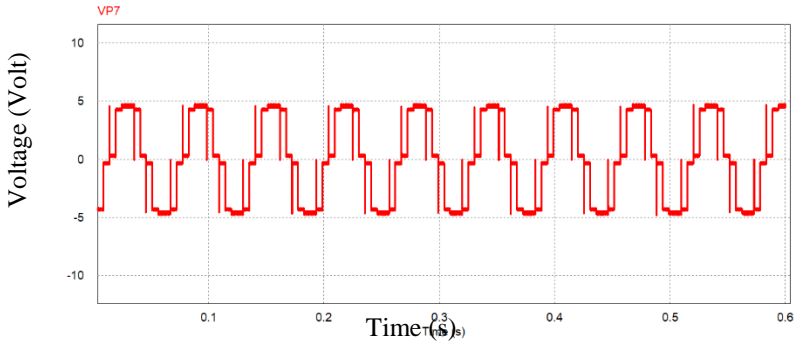
1.8.1 Pengendalian Motor BLDC dengan Metode *Pulse Amplitude Modulation* (PAM)

Pengendalian motor BLDC antara metode PAM dan metode PWM mempunyai perbedaan. Pada metode PWM tegangan output inverter 3 fasa tetap, kecepatan motor diatur oleh lebar pulsa sinyal switching inverter 3 fasa yang di modulasi. Sedangkan pada metode PAM tegangan output inverter di atur dan sinyal switching inverter tidak dimodulasi. Bentuk sinyal switching untuk mosfet pada inverter 3 fasa pada S1-S6 ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 0.3 Sinyal *switching mosfet (S1-S6) inverter 3 phase* dengan metode PAM

Seperti halnya pada PWM, input sinyal yang masuk ke mosfet mempunyai beda 60 derajat pada setiap saklar tanpa di modulasi. Karena pada metode PAM output tegangan inverter yang diatur maka dibutuhkanlah DC-Link. Tegangan DC-Link inverter 3 fasa dapatdiatur dengan menambahkan perangkat keras berupa DC-DC converter untuk mengubah suatu level tegangan ke level tegangan yang lebih rendah maupun lebih tinggi. Kelebihan dari metode PAM ini adalah memiliki gelombang output inverter yang lebih baik dibandingkan metode PWM. Bentuk gelombang output line to line inverter 3 fasa yang terhubung motor BLDC dengan metode *Pulse Amplitude Modulation (PAM)* ditunjukkan pada gambar 2.4.

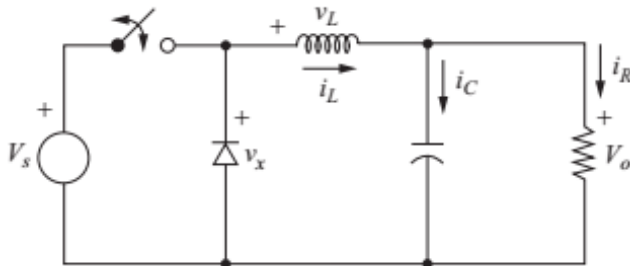


Gambar 0.4 Tegangan output *line-line inverter 3 phase* dengan PAM

Bentuk gelombang output line to line inverter 3 fasa tetap seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4, namun amplitudo teganganlah yang diubah sesuai dengan kecepatan motor yang diinginkan dengan alat DC-DC konverter.

1.9 Buck Konverter

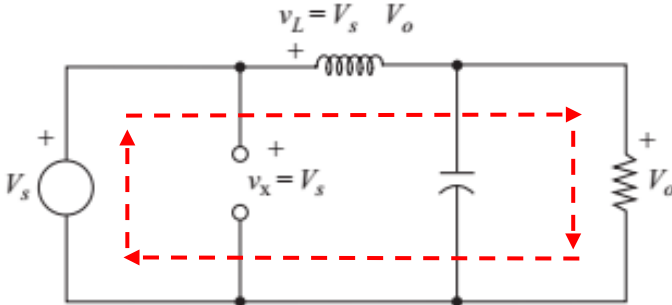
Buck converter adalah salah satu jenis DC-DC converter yang memiliki karakteristik untuk memberikan output lebih rendah dari input. Pada gambar 2.5 terlihat rangkaian dasar Buck konverter yang terdiri atas dioda, saklar, induktor dan filter kapasitor. Dioda berfungsi sebagai jalannya arus yang melewati induktor saat saklar terbuka, sedangkan kapasitor disini adalah sebagai filter agar output dari *Buck converter* mempunyai sinyal DC yang baik.[8]



Gambar 0.5 *Buck Converter standart circuit*[9]

Besarnya tegangan output *Buck converter* diatur oleh seberapa cepat saklar bekerja dalam satu cycle. Semakin cepat saklar bekerja, maka nilai outputnya akan semakin mendekati inputnya. Dalam aplikasinya saklar bisa menggunakan mosfet ataupun IGBT, keduanya memerlukan sinyal pwm trigger untuk dapat bekerja. Duty cycle dari pwm trigger inilah yang diatur agar *buck converter* memiliki output sesuai yang diinginkan.

Cara kerja dari *buck converter* ketika saklar tertutup, dioda dalam keadaan reverse sehingga sinyal input akan langsung menuju ke induktor dan terjadi penyimpanan energi. Gambar 2.6 adalah rangkaian ekuivalen pada saat saklar dalam keadaan tertutup (closed).



Gambar 0.6 *Buck Converter* kondisi tertutup [9]

Tegangan pada induktor saat saklar dalam keadaan tertutup dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$V_L = V_D - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

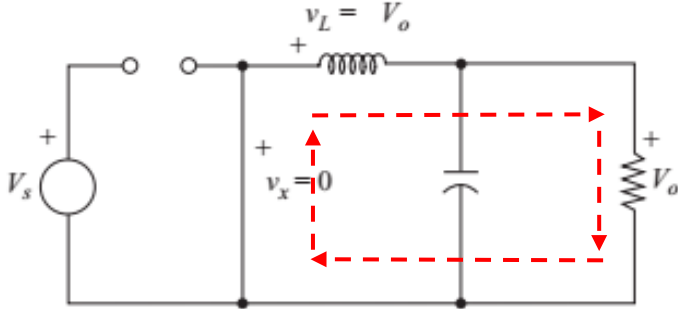
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_D - V_0}{L} \dots\dots\dots(2)$$

Ketika turunan dari I_L bernilai positif, maka arus meningkat secara linier. Dengan memodifikasi rumus sebelumnya, perubahan arus pada saat saklar tertutup ditunjukkan pada persamaan (3). Sehingga Δi_L pada saat saklar tertutup (closed) dapat dihitung dengan persamaan

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_D - V_0}{L} \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta i_{L \text{ closed}} = \left(\frac{V_D - V_0}{L} \right) \cdot DT \dots\dots\dots (4)$$

Sedangkan pada saat kondisi saklar terbuka diode menjadi bersifat forward bias, sehingga arus yang tersimpan di dalam induktor dapat mengalir melalui dioda seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.7.



Gambar 0.7 Buck Converter kondisi terbuka[9]

Dalam kondisi saklar terbuka tegangan pada induktor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5)

$$V_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_0}{L} \dots\dots\dots (6)$$

Ketika turunan dari I_L bernilai negatif, maka arus akan berkurang secara linier. Perubahan dari arus ketika saklar open ditunjukkan pada persamaan (7). Sehingga nilai Δi_L pada saat dioda open dapat dihitung seperti pada persamaan (8)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_0}{L} \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta i_{L \text{ opened}} = \left(\frac{-V_0}{L} \right) \cdot (1 - D)T \dots\dots\dots (8)$$

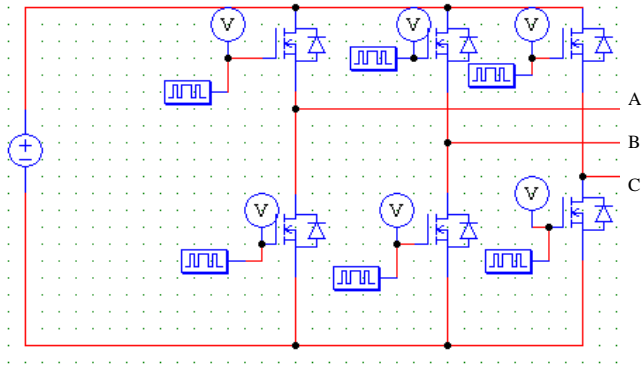
1.10 Inverter 3 Fasa

Inverter adalah sebuah alat untuk mengubah suatu tegangan DC menjadi tegangan AC. Selain dapat mengubah tegangan DC menjadi AC, inverter juga dapat mengatur besaran tegangan outputnya. Ada dua cara umum untuk mengubah level tegangan output dari inverter, pertama adalah dengan mengubah juga level tegangan input sehingga output mengikuti input, dan cara kedua apabila tegangan input konstan dengan mengatur gain dari inverter yang biasanya dilakukan dengan kontrol *duty cycle* PWM.[10]

Bentuk-bentuk gelombang yang dihasilkan oleh inverter ada 3 macam, yaitu gelombang output sinusoidal, square dan sinusoidal modulasi tergantung dari topologi sirkuit dan komponen dari inverter. Inverter juga dapat digolongkan berdasarkan jumlah fasanya, ada inverter 1 fasa, 3 fasa hingga inverter multi fasa.

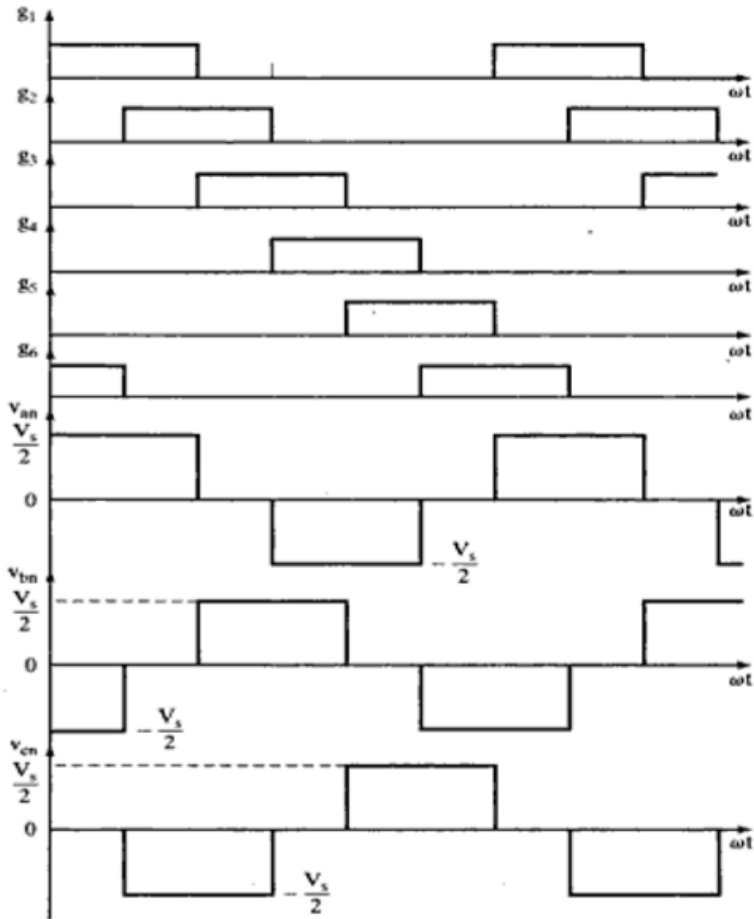
Gelombang sinyal inverter seperti yang dijelaskan tadi sangat bergantung pada sinyal komutasi. Dalam pengaturan komutasi dibagi menjadi 2 yaitu dengan sinyal komutasi SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) berbentuk gelombang sinus dan sinyal komutasi half bridge (komutasi 120° atau komutasi 180°) yang akan membuat output inverter berbentuk segi empat (square wave). Bentuk gelombang output inverter yang ideal adalah sinusoidal, namun dalam kenyataannya untuk melahirkan sinusoidal murni tidaklah mudah. Untuk daya rendah dan menengah, gelombang input inverter yang berupa square wave masih diperbolehkan, namun untuk daya tinggi dibutuhkan gelombang tegangan yang mendekati sinusoidal dan harmonisa yang kecil.

Inverter yang digunakan pada tugas akhir ini adalah jenis inverter yang 3 fasa dengan sinyal komutasi half bridge (komutasi 120°). Rangkaian inverter tiga fasa yang digunakan secara umum seperti pada gambar 2.8 dimana terdapat 6 buah saklar yang semuanya berupa mosfet untuk bisa menghasilkan output 3 fasa. Di dalam rangkaian bisa terlihat ada 2 bagian posisi mosfet, bagian atas untuk membangkitkan sinyal positif dan bagian bawah untuk membangkitkan sinyal negatif. Dalam satu fasa (1 line), sinyal komutasi antara mosfet atas dan bawah tidak boleh dalam keadaan on secara bersamaan, karena akan terjadi short di rangkaian. Oleh itulah pada komutasi half bridge hanya ada dua buah komutasi yaitu 120° dan 180° .



Gambar 0.8 *Inverter 3 phase pada umumnya*

Dalam pengerjaan tugas akhir ini menggunakan komutasi 120° yang artinya bahwa setiap saklar mosfet inverter bekerja ON selama 120° dan bekerja OFF selama 240° . Gambar 2.9 adalah sinyal gelombang komutasi setiap mosfet dalam 1 inverter dimana seperti yang sudah dijelaskan pada penjeasan sebelumnya antara S1-S4, S3-S6, S5-S2 tidak ada sinyal komutasi yang aktif bersamaan.



Gambar 0.9 Commutation Phase 120° [9]

Dalam menghasilkan sinyal AC 3 fasa memang inverter saja sudah cukup untuk membangkitkannya, tetapi untuk bisa menjadi controller motor BLDC maka diperlukan kesesuaian antara Hall of sensor dan saklar dari inverter 3 fasa untuk membangkitkan sudut putar di dalam motor. Di dalam tabel 2.1 terlihat bagaimana kombinasi on/off setiap saklar yang disesuaikan dengan hall sensor motor BLDC agar motor dapat bergerak searah jarum jam.

Tabel 0.1 On/off switch inverter 3 phase untuk putaran CW

Hall Sensor Value (H1,H2,H3)	Fasa	Switches
100	A-C	S1 ; S2
110	B-C	S3 ; S2
010	B-A	S3 ; S4
011	C-A	S5 ; S4
001	C-B	S5 ; S6
101	A-B	S1 ; S6

Terdapat 3 mode operasi dalam setengah periode yang ditunjukkan pada persamaan berikut

Mode 1 untuk $0 \leq \omega t \leq \pi/3$, switch 1 dan 6 konduksi

$$V_{an} = \frac{V_s}{2} \quad V_{bn} = -\frac{V_s}{2} \quad V_{cn} = 0 \dots \dots \dots (9)$$

Mode 2 untuk $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$, switch 1 dan 2 konduksi

$$V_{an} = \frac{V_s}{2} \quad V_{bn} = 0 \quad V_{cn} = -\frac{V_s}{2} \dots \dots \dots (10)$$

Mode 3 untuk $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$, switch 1 dan 2 konduksi

$$V_{an} = 0 \quad V_{bn} = \frac{V_s}{2} \quad V_{cn} = -\frac{V_s}{2} \dots \dots \dots (11)$$

Tegangan line to netral pada gambar 2.9 dapat dinyatakan dalam persamaan deret fourier yang ditunjukkan pada persamaan 12-14

$$V_{an} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \dots \dots \dots (12)$$

$$V_{bn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \dots \dots \dots (13)$$

$$V_{cn} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{7\pi}{6} \right) \dots \dots \dots (14)$$

Tegangan line a-b adalah $V_{ab} = \sqrt{3}V_{an}$. Oleh karena itu, tegangan line to line untuk beban hubungan bintang (Y-connected load) dapat dinyatakan dalam persamaan

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (15)$$

$$V_{bc} = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) \dots\dots\dots (16)$$

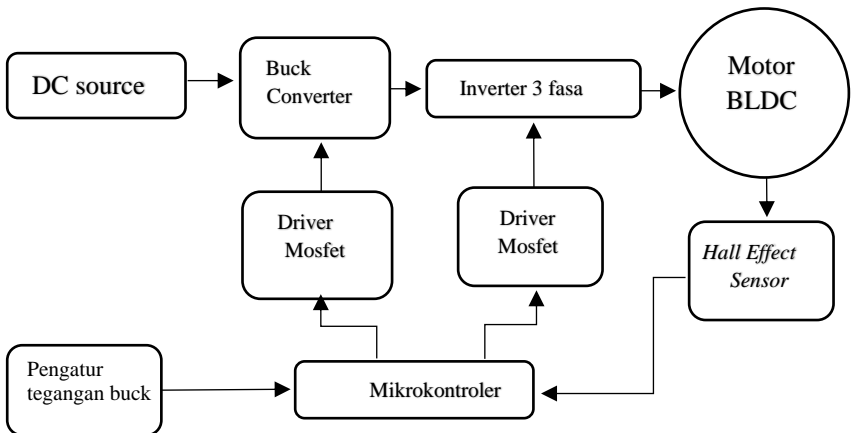
$$V_{ac} = \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{2\sqrt{3}V_s}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n(\omega t - \pi) \dots\dots\dots (17)$$

BAB 3 PERENCANAAN DAN PEMBUATAN ALAT

Pada bab ini dijelaskan mengenai perencanaan dan pembuatan alat untuk driver motor BLDC. Perangkat keras yang dibuat meliputi *buck converter*, inverter 3 fasa, coding *mikrokontroller*, driver mosfet inverter dan driver mosfet *buck converter*.

3.1. Block Diagram Sistem

Dalam sistem pembuatan kontroler motor BLDC, garis besar komponen dan urutan sistem kerjanya dapat diilustrasikan pada blok diagram sesuai pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram block system

Pengerjaan tugas akhir ini menggunakan sumber input berupa DC source. Tegangan yang berasal dari Dc source inilah yang selanjutnya masuk ke *buck converter*.

Pada metode PAM, daya dari baterai masuk ke *buck converter* untuk selanjutnya di atur besar tegangannya sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Untuk mengatur besarnya output *buck converter*, pengatur kecepatan yang bisa berupa throttle ataupun resistor variabel memberikan besaran hambatan yang akan masuk ke mikrokontroler. Besaran hambatan ini akan diproses oleh mikrokontroler kemudian

masuk ke dalam driver mosfet dari *buck converter* untuk dinaikkan tegangannya sesuai trigger mosfetnya. Dalam pemrosesan di *mikrokontroller*, PWM sinyal pengatur mosfetnya di ubah-ubah *duty cyclenya* dimana semakin besar *duty cycle* sinyal PWM maka output *buck converter* akan mendekati sumber tegangan input. Karena *duty cycle* tadi bergantung kepada pengatur kecepatannya, sehingga hasil akhir output converter akan mengikuti besaran dari pengatur kecepatannya.[11]

Setelah dari converter, masuk ke dalam inverter 3 fasa untuk menghasilkan bentuk tegangan yang dapat memutar BLDC. Sesuai gambar 3.1 mosfet dari inverter tetap diatur oleh mikrokontroler, akan tetapi di dalam mikrokontroler, sinyal PWM mosfet tidak dimodulasi sehingga *duty cyclenya* tetap dan besar output inverter bergantung kepada inputnya. Karena sistem membangkitkan tegangan untuk dapat memutar BLDC, maka feedback posisi permanen magnet dari motor dibutuhkan. Feedback dari motor ini berupa Hall of sensor yang akan masuk ke dalam mikrokontroler. Selanjutnya output Hall of sensor diproses oleh mikrokontroler dan penyalan pada saklar inverter didasarkan pada posisi magnet sesuai dengan kombinasi komutasi BLDC.

Berdasarkan blok diagram yang ditunjukkan pada gambar 3.1, maka perencanaan dan pembuatan kontroler adalah sebagai berikut:

1. Perencanaan dan pembuatan rangkaian *buck converter*.
2. Perencanaan dan pembuatan inverter 3 fasa.
3. Pemrograman mikrokontroler.

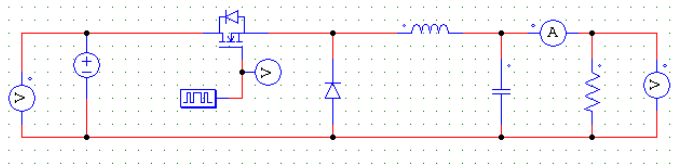
3.2. Perencanaan dan Pembuatan Rangkaian *Hall Effect Sensor*

Dalam menjalankan motor BLDC, pengaturan switch dari inverter 3 fasa membutuhkan posisi magnet permanen pada motor BLDC. Oleh sebab itu dibutuhkan *hall effect sensor* untuk menentukan pola switching pada inverter. Pembacaan sinyal *hall effect sensor* secara langsung masuk kedalam mikrokontroler tidak dapat dilakukan, sehingga dibutuhkan rangkaian pembacaan *hall effect sensor*. Untuk mengaktifkan hall of sensor juga dibutuhkan tegangan 5V yang diinputkan langsung ke motor.

3.3. Perencanaan dan Pembuatan *Buck Converter Constant Voltage*

Buck converter adalah suatu peralatan elektronika yang dapat bekerja dengan frekuensi tinggi. Peran dari *buck converter* ini salah satunya sebagai piranti power supply. Karakter dari converter ini adalah dapat menurunkan tegangan DC tanpa menggunakan trafo, yaitu dengan

mengatur *duty cycle* dari proses switching mosfet. Rangkaian dari *buck converter* sendiri diilustrasikan pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Rangkaian *Buck Converter*

3.3.1 Penghitungan Parameter *Buck converter*

Karena pada tugas akhir ini menggunakan sumber baterai 3x12V maka parameter dan perhitungannya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{in \max} &= 30\text{V} \\ V_o &= 15\text{V} \\ I_o &= 6 \text{ A} \\ \text{Switching freq} &= 7812.5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Dari parameter diatas dapat dilakukan perhitungan untuk mendesain rangkaian *buck converter*. Berikut ini adalah penjabaran dari perhitungan desain *buck converter*:

Duty Cycle

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{15}{30} = 0.5$$

Average Inductor Current

$$\begin{aligned} I_{L(\text{avg})} &= I_o = \frac{V_o}{R} \\ 6 &= \frac{15}{R} \\ R &= 2.5 \Omega \\ \Delta I_L &= 0.1 \times I_L = 0.6\text{A} \end{aligned}$$

Nilai Induktor

$$L = \left(\frac{1}{f} \right) \times (V_{in \max} - V_o) \times \left(\frac{V_o}{V_{in \max}} \right) \times \left(\frac{1}{\Delta I_L} \right)$$

$$L = \left(\frac{1}{7812.5} \right) \times (30 - 15) \times \left(\frac{15}{30} \right) \times \left(\frac{1}{6} \right)$$

$$L = 0.16mH$$

Arus Induktor Maksimum

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta I_L}{2} = 6 + 0.3 = 6.3A$$

Jumlah Split

Dalam pemilihan kabel harus memperhatikan AWG *Wire gauge inductor* seperti pada tabel 3.1.

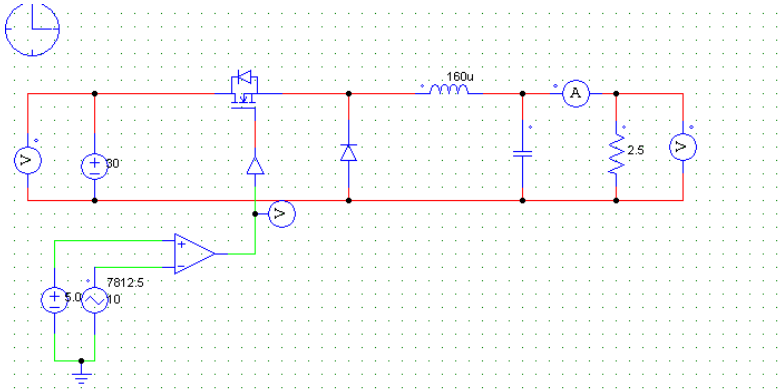
Tabel 3. 1 AWG Wire Gauge Inductor

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

Dengan memperhatikan maksimum arus, maksimum frekuensi, dan fleksibilitas kabel maka dipilih kawat dengan diameter 0,65mm dengan maksimum arus 0.92.

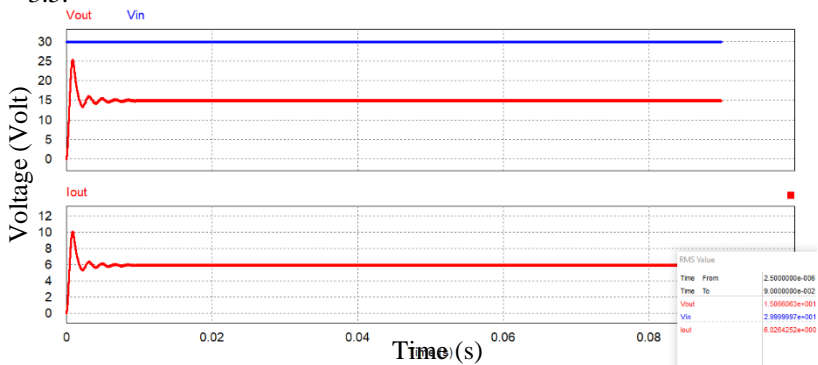
$$Jumlah\ Split = \frac{I_L}{I_{split}} = \frac{6}{0.92} = 5\ lilitan$$

Sebelum pembuatan *hardware buck converter*, dilakukan apakah parameter diatas apabila disimulasikan mendapatkan hasil yang sesuai seperti perhitungan.



Gambar 3. 3 simulasi *Buck Converter open loop*

Dari rangkaian simulasi seperti pada gambar 3.3 menggunakan software PSIM didapat nilai output *buck converter* seperti pada gambar 3.4 dan 3.5.



Gambar 3. 4 Gelombang tegangan dan arus output dari *buck converter*

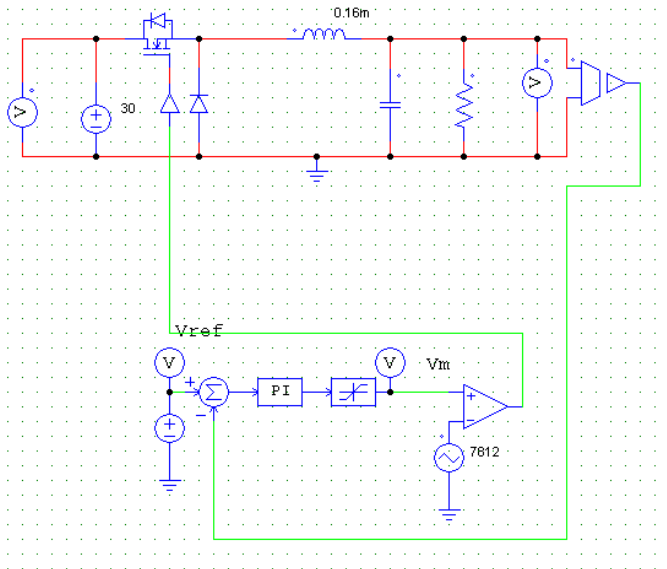
RMS Value

Time From	2.5000000e-006
Time To	9.0000000e-002
VP2	1.5066063e+001
VP1	2.9999997e+001
I1	6.0264252e+000

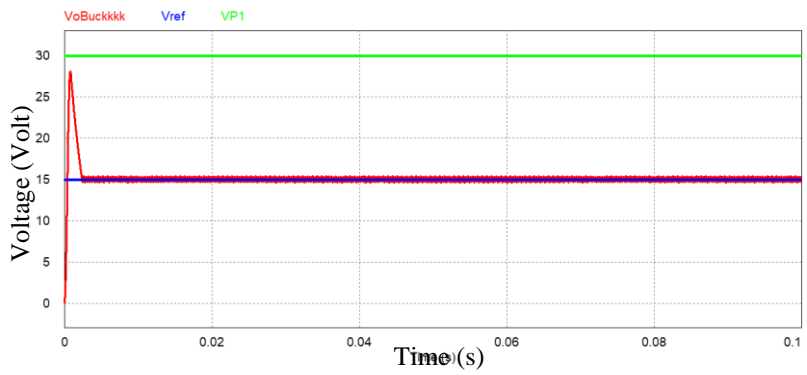
Gambar 3. 5 Nilai RMS value dari simulasi *buck converter*

Dari gambar 3.3, 3.4, 3.5 gelombang tegangan input sebesar 30 V di step down dengan *duty cycle* sebesar 50%. Sehingga didapatkan hasil tegangan output sebesar 15V dan arus sebesar 6 ampere.

Dari data diatas selanjutnya dilakukan pensimulasian *buck converter constant voltage*. Dimana *buck converter* ini mempunyai feedback berupa tegangan output yang nantinya akan diproses oleh *mikrokontroller*. Gambar 3.6 adalah bagan dari *buck converter constant voltage* yang disimulasikan dengan PSIM. Dari gambar apabila akan di run, maka output tegangan dari *buck converter* akan menyesuaikan dari tegangan referensi. Sehingga didapatkan gambar 3.7 sebagai hasil dari simulasi *buck converter constant voltage*. Garis merah mewakili tegangan *output buck converter*, garis biru mewakili tegangan referensi, dan garis hijau adalah tegangan *input buck converter*.



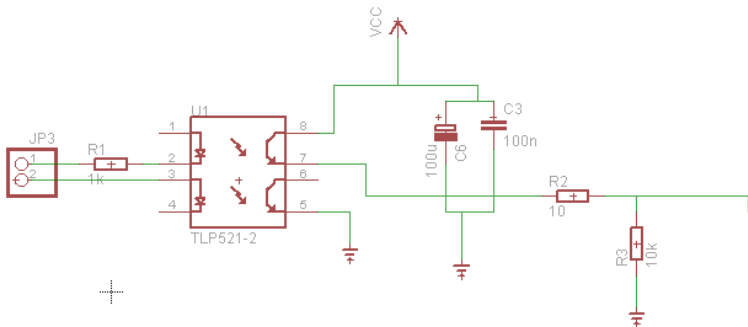
Gambar 3. 6 buck converter constant voltage



Gambar 3. 7 Hasil simulasi PSIM dari buck converter constant voltage

3.3.2 Pembuatan driver mosfet *Buck Converter*

Rangkaian driver mosfet digunakan sebagai kopling atau penghubung antara mikrokontroler dengan mosfet pada rangkaian DC-DC *Converter* karena *mikrokontroler* tidak mampu mengendalikan konverter secara langsung. Level tegangan dari *mikrokontroler* hanya sebesar 0-5 Volt sedangkan untuk mengendalikan mosfet membutuhkan tegangan ± 12 Volt sehingga membutuhkan rangkaian *optocoupler* ini untuk mengendalikan mosfet. Sekaligus sebagai rangkaian pengaman untuk mikrokontroler jika terjadi masalah pada sisi konverter maka pada sisi mikrokontroler tidak terpengaruh karena pada rangkaian ini terdapat isolasi antara input dengan output. Pada Tugas Akhir ini dibuat menggunakan IC TLP 250 untuk mengendalikan mosfet pada rangkaian *buck converter*. IC ini dipilih karena mampu mendriver frekuensi sinyal dari *mikrokontroler* sebesar 7812.5Hz. Rangkaian driver mosfet yang dibuat yaitu seperti gambar 3.8.



Gambar 3. 8 *Optocoupler circuit* dengan IC TLP521

3.3.3 Pembuatan Sensor Tegangan *Buck Converter*

Buck converter pada tugas akhir ini menggunakan sistem *close loop*. Oleh karena itu dalam proses untuk mendapatkan tegangan yang sesuai dibutuhkan sensor tegangan pada sisi output. Sensor tegangan yang digunakan di dalam tugas akhir ini hanya menggunakan dua buah resistor sebagai pembanding sebelum masuk ke *mikrokontroler*.

Pembacaan sensor tegangan pada rangkaian ini menganut pembacaan analog pada arduino. Arduino hanya bisa menerima

pembacaan analog dari range 0-5V saja, oleh karena itu apabila dalam pembacaan tegangan analog lebih dari 5V, perlu dilakukan pembagian tegangan agar tegangan yang masuk ke pin analog arduino tidak lebih dari 5V.

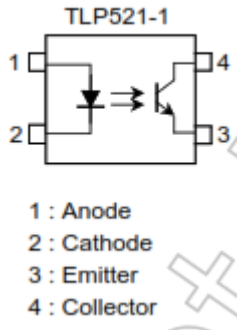
Konsep dari pembagian tegangan ini sama seperti pengkonversian tegangan asli menjadi range 0-5V. Untuk mencari nilai yang sesuai untuk R1 dan R2 adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= 30V \text{ (max)} \\
 V_o &= 5V \text{ (max)} \\
 R_1 &= \text{ambil satu nilai} \\
 V_o &= \frac{R_2}{R_1+R_2} \times V_{in} \dots\dots\dots(18)
 \end{aligned}$$

3.4 Perencanaan dan Pembuatan Inverter

Driver mosfet inverter 3 fasa digunakan sebagai penyulut MOSFET yang digunakan pada rangkaian inverter karena pulsa luaran dari PWM mikro tidak mampu menyulut mosfet secara langsung. Tegangan luaran PWM mikro sebesar ±5 V, sedangkan tegangan penyulutan MOSFET sebesar 10-20 V sehingga dibutuhkan *driver mosfet* inverter tiga fasa sebagai penyulut mosfet pada inverter. Pada proyek akhir ini menggunakan IC IR2110 sebagai driver mosfet inverter 3 fasa.

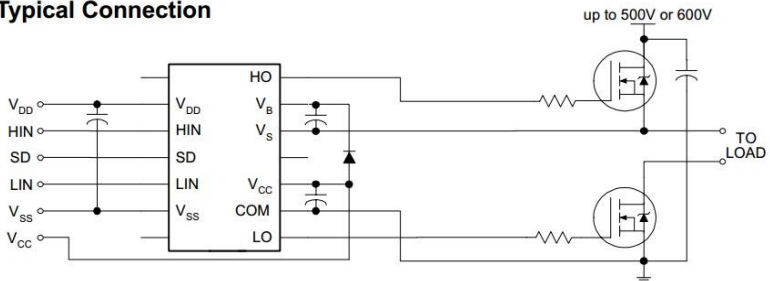
Selain menggunakan driver mosfet, dalam tugas akhir ini juga menggunakan *optocoupler* TLP 521. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya *optocoupler* adalah suatu komponen untuk melindungi *mikrokontroller* dari kerusakan yang terjadi di PCB. Cara kerja dari *optocoupler* ini hampir mirip dengan yang ada di *buck converter*, yaitu dari sinyal *mikrokontroller* yang maksimal sebesar 5V, akan disalin karakteristik sinyalnya lalu dinaikkan tegangannya menjadi 12V, lalu keluaran sinyal dari *optocoupler* ini akan masuk ke dalam driver gate IC 2110. Pin konfigurasi dari IC TLP 521 adalah seperti yang tertera pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Konfigurasi *pin TLP 521*

Driver mosfet IR2110 juga digunakan sebagai driver high side dan low side mosfet. Karena pada rangkaian inverter terdapat mosfet pada sisi atas dan sisi bawah. Pada mosfet sisi atas untuk menyulutnya membutuhkan floating ground, pada driver ini IC IR2110 juga berfungsi sebagai penyedia floating ground pada mosfet bagian atas (high side mosfet).

Typical Connection

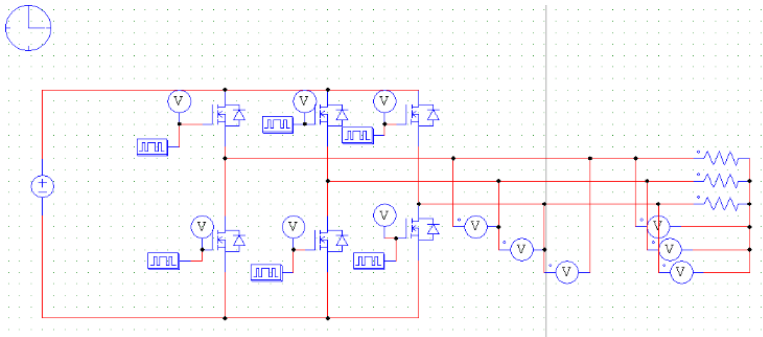


Gambar 3. 10 Driver mosfet IR 2110 circuit

IC ini mampu bekerja pada frekuensi $t_{on/off}$ sebesar 10 MHz dan memberikan nilai *dead time* selama 10 ns. Pada IC IR2110 terdapat dua pin masukan yang dapat digunakan untuk dua sinyal PWM, sehingga dibutuhkan tiga buah IC IR2110 dalam proyek akhir ini. Rangkaian skematik IR2110 dan *board PCB* rangkaian IR2110 berturut-turut ditunjukkan pada gambar yang terdapat pada lampiran.

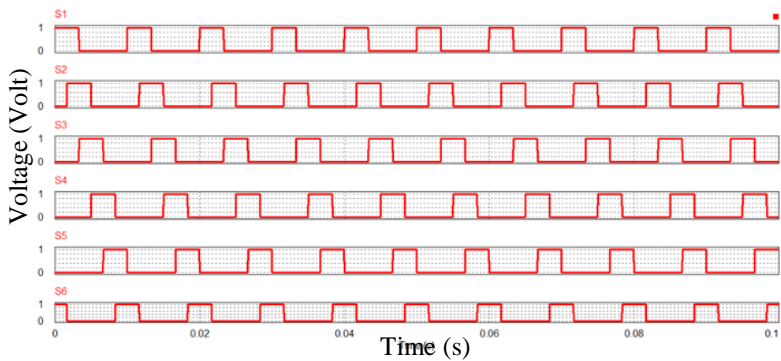
Dalam pemilihan mosfet dari inverter 3 fasa ini menggunakan mosfet IR3205 yang dipararel 2 buah pada setiap fasanya. Mosfet ini dapat bekerja sampai arus maksimal 80Ampere dan tegangan drain source sebesar 55V. Dalam satu inverter ini dibutuhkan sebanyak 6x2 buah mosfet IRF3205.

Untuk perencanaan inverter 3 fasa dibuat dengan menggunakan software PSIM seperti yang terlihat pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 *Inverter 3 phase simulation dengan PSIM*

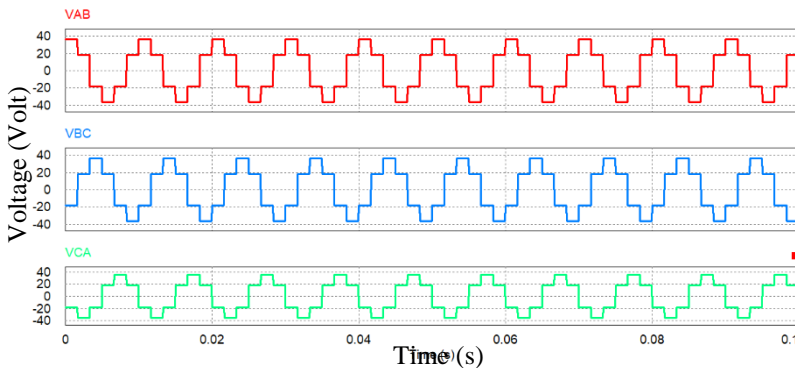
Sedangkan gambar sinyal pwm untuk pensaklaran tiap MOSFET pada inverter tiga fasa dengan komutasi 120° terdapat pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 *Sinyal Switching dari S1-S6 inverter 3 fasa*

Pada Gambar 3.11 merupakan gambar sinyal PWM yang digunakan dalam pensaklaran *gate* MOSFET. Dari Gambar 3.14 dapat diamati bahwa perbedaan tiap step pada penyulutan tiap mosfet yaitu 60° , dan untuk tiap mosfet melakukan komutasi sebesar 120° . Perbedaan sudut penyulutan antara MOSFET sisi *high* dengan MOSFET sisi *low* yaitu sebesar 240° . Sebagai contoh dapat dilihat pulsa pensaklaran antara S1 dengan S4, S3 dengan S6, dan S5 dengan S2, masing-masing berbeda sudut sebesar 240° . Sedangkan sudut penyulutan antara MOSFET sisi *high* dengan MOSFET sisi *high* yang lain yaitu berbeda 120° . Begitu pula antara sisi *low* dengan sisi *low* yang lain, masing-masing berbeda 120° . Sebagai contoh dapat dilihat pulsa pensaklaran sisi *high* antara S1 dengan S3, S3 dengan S5, dan S5 dengan S1, serta pada sisi *low* antara S4 dengan S6, S6 dengan S2, dan S2 dengan S4.[12]

Gelombang tegangan luaran line to line dan hasil simulasi nilai tegangan luaran line to line inverter 3 fasa ditunjukkan pada Gambar 3.13 dan 3.14.

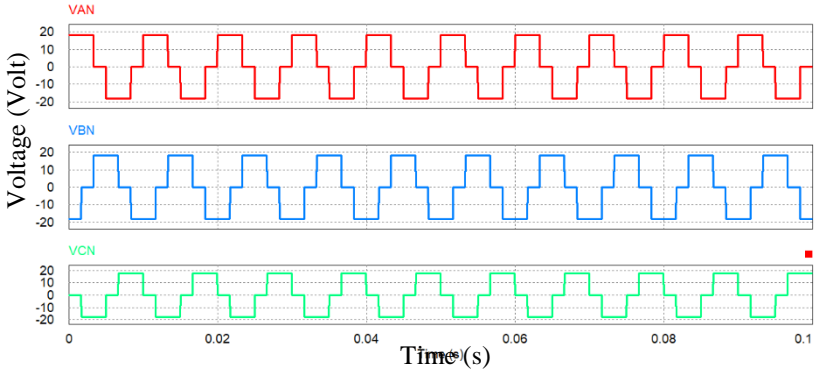


Gambar 3. 13 Sinyal tegangan output *line to line inverter 3 phase*

Pada Gambar merupakan nilai tegangan line to line output inverter 3 fasa dengan komutasi 120° dengan tegangan dc input 30 Volt dari hasil simulasi menggunakan software PSIM. Secara teori tegangan output line to line yaitu:

$$V_{out} = 0.6753 \times V_{dc} \dots \dots \dots (19)$$

Sedangkan gelombang tegangan luaran line to line output inverter 3 fasa ditunjukkan pada Gambar 3.14.



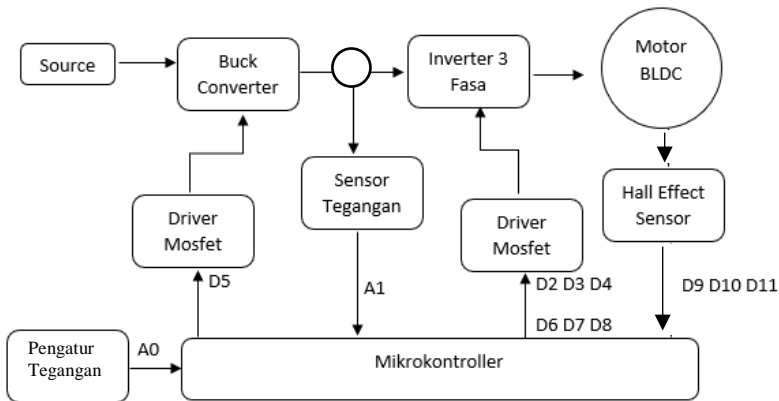
Gambar 3. 14 Sinyal tegangan output *line to neutral inverter 3 phase*

Pada Gambar 3.14 merupakan nilai tegangan line to neutral output inverter 3 fasa dengan komutasi 120° dengan tegangan dc input 30 Volt dari hasil simulasi menggunakan software PSIM. Secara teori tegangan output line to neutral yaitu:

$$V_{out} = 0,3898 \times V_{out} \dots \dots \dots (20)$$

3.5 Perencanaan Pengcodingan Arduino

Pada tugas akhir ini menggunakan *mikrokontroller* arduino uno sebagai otak dari keseluruhan alat. Dimana *mikrokontroller* akan memberikan input pwm kepada mosfet *buck converter* dan input pensaklaran kepada inverter 3 fasa. Input pensaklaran dari inverter 3 fasa ini didasarkan kepada hall of sensor dari motor BLDC. Berikut adalah block diagram kontrol gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Block Diagram kontrol arduino

Mikrokontroler merupakan otak dari seluruh sistem yang dibuat. Mikrokontroler arduino yang akan dibuat digunakan untuk pengaturan kecepatan putaran motor BLDC. Inverter 3 fasa menerima masukan berupa sinyal *Six-Step* 120 derajat. Sedangkan masukan mikrokontroler berupa ADC yaitu pengatur kecepatan berupa potensiometer dan sinyal dari *Hall effect sensor* yang masuk ke digital mikrokontroler.

Sinyal penyulutan MOSFET untuk sisi *high side* (H1, H2, & H3) pada inverter 3 fasa secara berturut-turut ditunjukkan pada D2, D4, D7 sedangkan sinyal penyulutan MOSFET untuk sisi *low side* pada D3, D6, D8. Penyulutan sinyal ini bergantung kepada masukan *hall effect sensor* ke *mikrokontroler* yaitu pada pin D9, D10, dan D11.

Untuk pengaturan *buck converter* ini menggunakan potensiometer sebagai pengatur besarnya *duty cycle* PWM yang masuk ke mosfet. A0 merupakan pin dari potensiometer ke *mikrokontroler*, dan respon dari potensiometer ini adalah D5 dengan frekuensi yang sudah ada di dalam list arduino 7812.5Hz. Untuk penjabaran dari keseluruhan port arduino akan dijelaskan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Tabel Input Output dari *Mikrokontroler* Arduino

No	Pin	Keterangan
1	D2	Inverter 3 fasa
2	D3	Inverter 3 fasa
3	D4	Inverter 3 fasa
4	D6	Inverter 3 fasa
5	D7	Inverter 3 fasa
6	D8	Inverter 3 fasa
7	D9	Hall Effect Sensor
8	D10	Hall Effect Sensor
9	D11	Hall Effect Sensor
10	D5	Output Buck ke IC
11	A0	Pengatur tegangan buck
12	A1	Input Vout <i>Buck Converter</i>
13	5V	Source DC 5V
14	Gnd	Ground

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

Dalam bab ini akan dilakukan pengujian perangkat hardware dan analisis sub-bagian pada sistem sesuai dengan perencanaan yang telah dilakukan pada BAB III.

3.6 Metode Pengujian

Pengujian dimaksudkan untuk mendapatkan evaluasi terhadap keluaran dari rangkaian perangkat keras yang telah dibuat maupun sistem agar diperoleh kinerja yang sesuai dengan yang diharapkan. Metode pengujian meliputi dua pengambilan data, yaitu pengujian parsial dan pengujian integrasi.

A. Pengujian Parsial

1. Pengujian sinyal *six-step* pada *mikrokontroller*
2. Pengujian Inverter
3. Pengujian *Buck converter*
4. Pengujian *Hall of sensor*

B. Pengujian Integrasi Sistem

1. Pengujian integrasi sistem dengan motor BLDC tanpa beban

Adapun peralatan yang digunakan dalam melakukan pengujian antara lain:

1. Osiloskop
2. *DC Power Supply*
3. *Volt Meter DC*
4. *Ampere meter DC*
5. Motor BLDC
6. *Tacho meter*

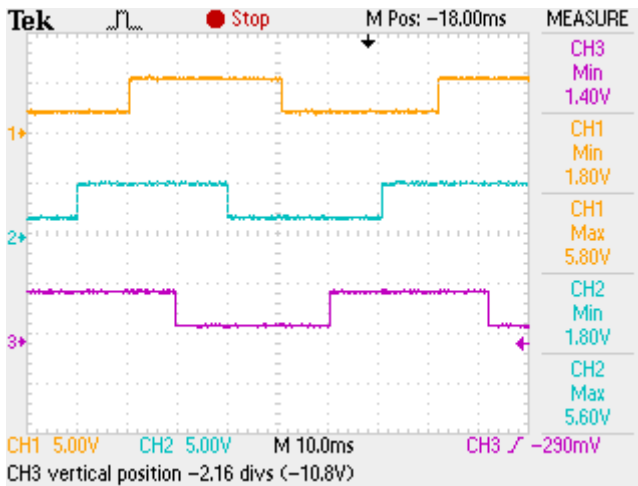
3.7 Pengujian Parsial

3.7.1 Pengujian Sinyal Six Step pada Mikrokontroller

Pada tugas akhir ini, dilakukan pembangkitan sinyal *six-step* yang digunakan untuk menyalakan mosfet dalam menjalankan inverter 3 fasa. Sinyal ini akan berjalan secara terus menerus menyesuaikan dari gerak motor BLDC, sehingga dalam pembangkitannya *mikrokontroller* harus dalam keadaan baik.

Terdapat 6 port digital yang digunakan untuk menghasilkan sinyal penyulutan mosfet inverter 3 fasa. Sedangkan 3 port digital lagi untuk input *hall of sensor* dari motor BLDC. Sinyal penyulutan mosfet untuk sisi *high side* (H1, H2, H3) secara berturut-turut adalah D2, D4, D7. Sedangkan sinyal penyulutan mosfet untuk sisi *low side* (L1, L2, L3) secara berturut-turut adalah D3, D6, D8. Sinyal masukan hall of sensor berturut-turut adalah D9, D10, D11.

Pengetesan *mikrokontroler* apakah dalam keadaan baik dapat dilakukan dengan menginput program six step komutasi 120 derajat pada setiap pin digital arduino. Selanjutnya dengan menggunakan osiloskop, kita lihat bagaimana sinyal arduino ini dibangkitkan.



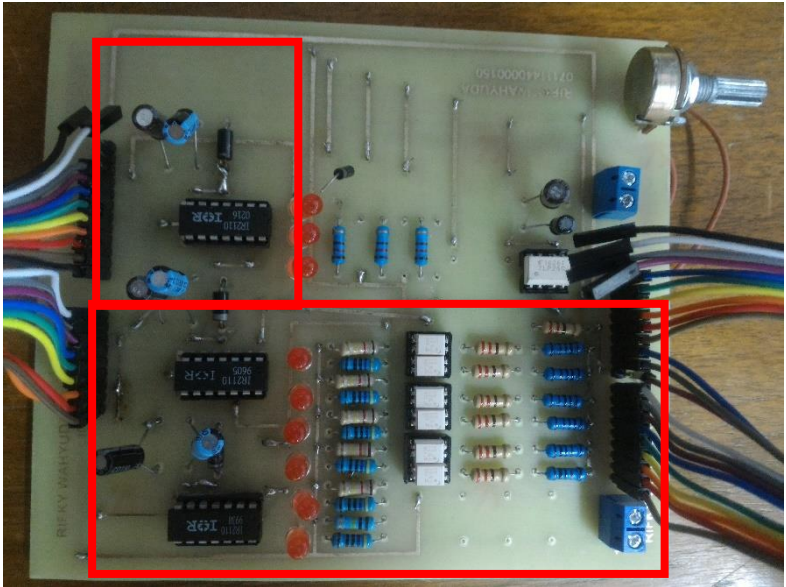
Gambar 4. 1 Sinyal *Six-Step Commutation 120° S1* (blue), *S2* (purple), *S3* (orange)

Karena keterbatasan probe yang baik dan osiloskop, S4, S5 dan S6 hampir sama hasilnya dengan gambar diatas. Dari gambar 4.1 dapat terlihat bahwa komutasi *six-step* sudah benar sehingga dapat dilanjutkan untuk pengujian inverter 3 fasa.

3.7.2 Pengujian Inveter 3 fasa

Pada bab 3 telah dijelaskan perancangan dan pembuatan driver inverter 3 fasa. Hardware dari rangkaian kontroller inverter 3 fasa

menggunakan IC IR2110 dan *optocoupler* TLP 521 ditunjukkan pada gambar 4.2.

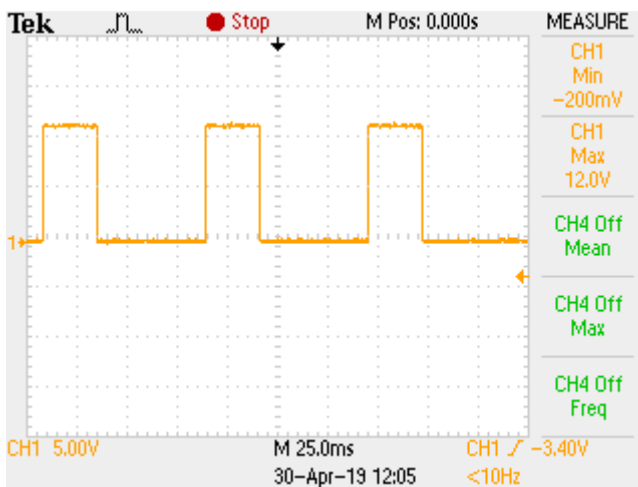


Gambar 4. 2 Desain *Controller of inverter 3 phase*

Terdapat 3 buah IC IR2110 dengan 6 buah *optocoupler* TLP 521 (pin 4) sebanyak 6 buah. IC IR2110 merupakan driver dari inverter sedangkan IC TLP521 merupakan IC *optocoupler*. Opto coupler merupakan rangkaian pemisah yang digunakan untuk mengopel suatu sinyal agar bagian kontrol dan bagian yang dikontrol tidak terhubung secara langsung, sehingga apabila terjadi kerusakan pada bagian yang dikontrol tidak menyebabkan kerusakan pada bagian kontrol. Pada hardware rangkaian IR2110 yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, terdapat enam buah lampu LED juga yang digunakan sebagai indikator penyulutan masing-masing MOSFET. Masukan dari hardware rangkaian IR2110 adalah enam pulsa penyulutan MOSFET yang berasal dari mikrokontroler, sedangkan keluaran dari rangkaian IR2110 berupa enam sinyal yang akan masuk pada pin MOSFET.

Setelah pembuatan *hardware* dari rangkaian driver inverter tiga fasa selanjutnya dilakukan pengujian dari rangkaian. Pada pengujian ini yaitu dilakukan untuk mengamati respon dari keluaran *driver* inverter IR2110 yang akan menjadi penyulut MOSFET pada kaki *gate*-nya. Pengujian dilakukan pada sebuah IR2110 dengan memberi dua sinyal pada dua chanel masukan. Pengujian driver mosfet ini dilakukan dengan melihat output sinyal dari pin HO (high side output) dan LO (low side output) pada ic IR2110. Bila tegangan yang terukur pada HO dan LO saat posisi HIGH adalah sebesar 12V dan saat LOW adalah sekitar 0V, maka sudah sinyal dari *mikrokontroller* sudah sampai ke gate driver.

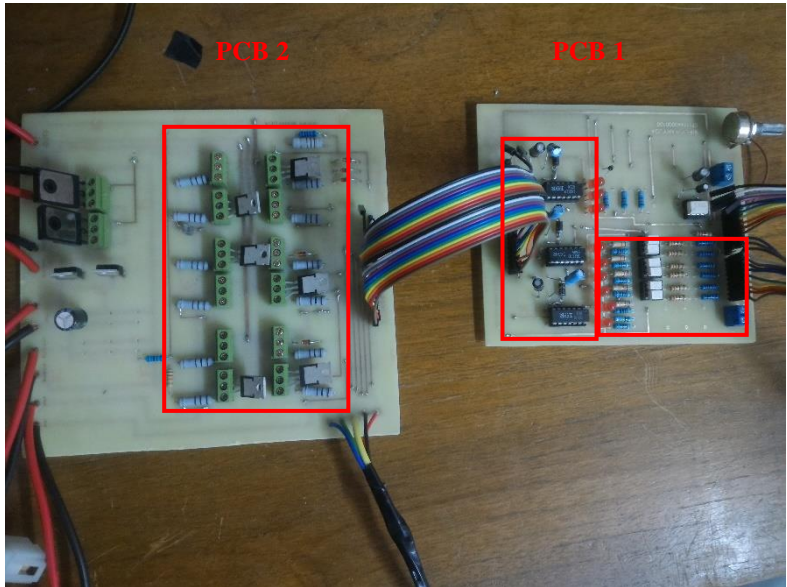
Dari gambar 4.3 bisa kita lihat kondisi saat sinyal high dan kondisi saat sinyal low pada driver mosfet. Kondisi high diwakili dengan tegangan 0 dan kondisi low 12 V



Gambar 4. 3 Kondisi *HIGH* dan *LOW* dari IC IR2110

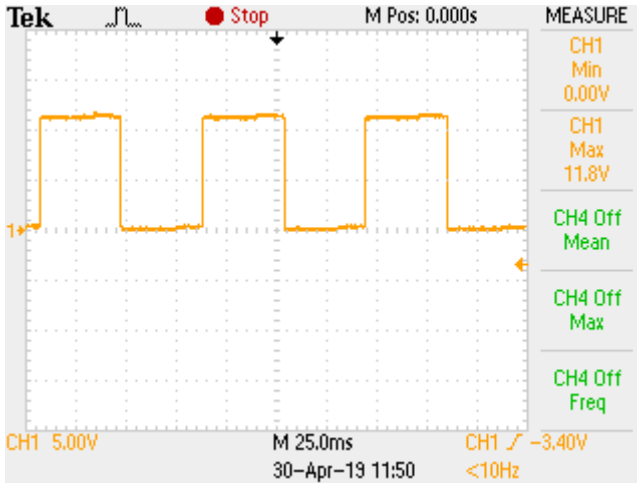
Bila dari gate driver mosfet sudah benar, maka selanjutnya sinyal tersebut akan masuk ke gate dari mosfet. Jalannya sinyal dari *mikrokontroller* ke mosfet adalah berawal dari program arduino membangkitkan sinyal pada pin digital. Selanjutnya dari pin digital akan masuk ke *optocoupler* dan dinaikkan tegangannya menjadi 12V pada fase HIGH. Keluar dari *optocoupler* akan bercabang untuk masuk ke dalam LED dan IC IR 2110, seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya

LED berguna untuk mengetahui bagaimana jalannya sixstep pada inverter saat motor dijalankan, dan IC IR 2110 adalah driver mosfet. Setelah mencapai driver mosfet akan berpindah ke pcb kedua, di pcb kedua sinyal tadi akan masuk ke gate dari mosfet. Gambar dari hardware akan ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4. 4 *Inverter 3 phase circuit*

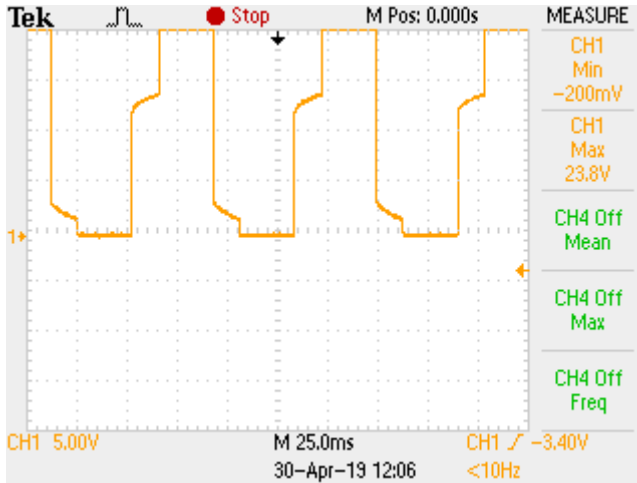
Sinyal dari *mikrokontroller* dikatakan sudah masuk ke mosfet pada saat gate mosfet sudah memiliki tegangan lebih dari 12V pada posisi HIGH dan 0V pada posisi LOW. Dengan menggunakan osiloskop kita dapat mengetahui bagaimana sinyal yang masuk ke gate mosfet dengan menghubungkan probe osiloskop pada gate dari mosfet.



Gambar 4.5 Kondisi tegangan dari *gate mosfet*

Dari gambar 4.5 kita dapat melihat berapa besar tegangan maksimum saat posisi HIGH dan minimum saat posisi LOW. Untuk metode *pulse amplitude modulation*, amplitudo dari sisi drain akan bertambah tinggi saat kita ingin menaikkan tegangan. Imbasnya sisi gate juga akan bertambah tinggi seiring dengan bertambahnya tegangan pada sisi drain seperti pada gambar 4.6.

Oleh karena itu dalam desain inverter diperlukan dioda zener untuk dapat memotong tegangan dari sisi gate agar tegangannya berkisar antara 10-20 V.



Gambar 4. 6 Kenaikan tegangan *gate mosfet* dikarenakan kenaikan tegangan *drain* mosfet

Selanjutnya adalah dilakukan pengujian pada sisi 3 fasa inverter. Dalam pengujian ini diambil data pada setiap fasa dengan Line to Line dan Line to Netral. Berikut data yang telah diambil:

A. Line to Netral

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada bab 2, line to netral adalah pengambilan data dengan menghubungkan probe positif ke fasa, dan probe negatif ke netral dari rangkaian. Data real dari hardware ini akan dibandingkan dengan data dari simulasi menggunakan PSIM.

$$V_{out\ line-neutral\ (teori)} = 0,3898 \times V_{in(DC)}$$

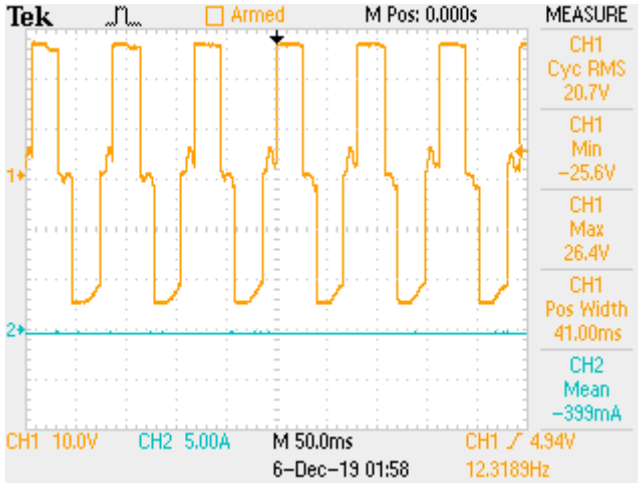
$$Error = \frac{|V_{out(l-n)(praktek)} - V_{out(l-n)(teori)}|}{V_{out(l-n)(teori)}} \times 100\%$$

Berikut adalah data line to netral dari inverter 3 fasa.

Tabel 4. 1 Hasil pengujian dari *Line to Netral Inverter 3 phase*

Inverter L-N							
Vin	Vout Teori	Vout Pengujian			Error(%)		
		A-N	B-N	C-N	A-B	B-C	A-C
5	1.94	2.58	2.63	2.54	32.99	35.57	30.93
10	3.89	5.56	5.17	5.58	42.93	32.90	43.44
15	5.84	7.63	7.66	7.64	30.65	31.16	30.82
20	7.79	10.1	10.6	10.4	29.65	36.07	33.50
25	9.74	12.5	12.8	12.4	28.34	31.42	27.31
30	11.69	15.5	15.8	15.7	32.59	35.16	34.30

Dari tabel 4.1 terlihat bahwa error dari inverter relatif besar, ada banyak faktor dalam besarnya error yang terjadi pada inverter diantaranya rangkaian, coding arduino dan pemilihan mosfet. Untuk hasil dari sinyal dari osiloskop line to netral inverter 3 fasa terlihat pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Tegangan Output dari *Line to Neutral Inverter 3 phase*

B. Line to Line

Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2, pengukuran line to line inverter 3 fasa ini mengkoneksikan probe osiloskop pada tiap fasanya. Probe positif ke fasa A negatif ke fasa B (A-B), probe positif ke B negatif ke C (B-C), probe positif ke C negatif ke A (A-C) sehingga didapatkan data line to line dari inverter 3 fasa. Data real tadi dibandingkan dengan data simulasi PSIM menghasilkan data seperti pada tabel 4.2.

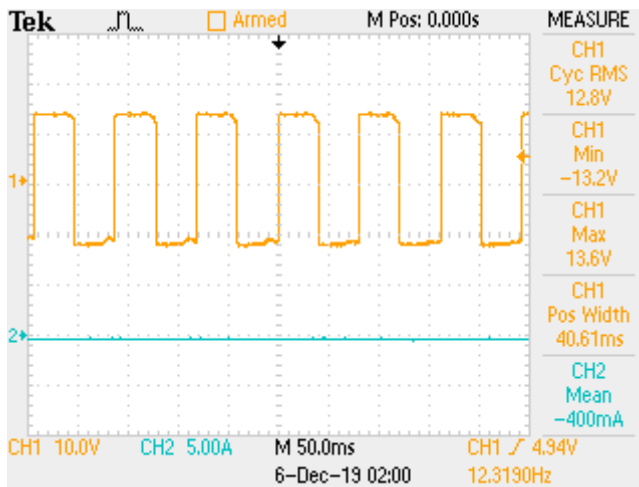
$$V_{out\ line-line\ (teori)} = 0,6753 \times V_{inDC}$$

$$Error = \frac{|V_{out\ line-line\ (praktek)} - V_{out\ line-line\ (teori)}|}{V_{out\ line-line\ (teori)}} \times 100\%$$

Tabel 4. 2 Hasil pengujian dari *Line to Line inverter 3 phase*

Inverter L-L							
Vin	Vout Teori	Vout Pengujian			Error(%)		
		A-B	B-C	A-C	A-B	B-C	A-C
5	3.37	4.12	4.3	4.21	22.26	27.60	24.93
10	6.75	8.26	8.27	8.23	22.37	22.52	21.93
15	10.12	12.4	12.5	12.1	22.53	23.52	19.57
20	13.5	16.6	16.5	16.2	22.96	22.22	20.00
25	16.8	20.5	20.6	20.5	22.02	22.62	22.02
30	20.25	24.8	25	24.7	22.47	23.46	21.98

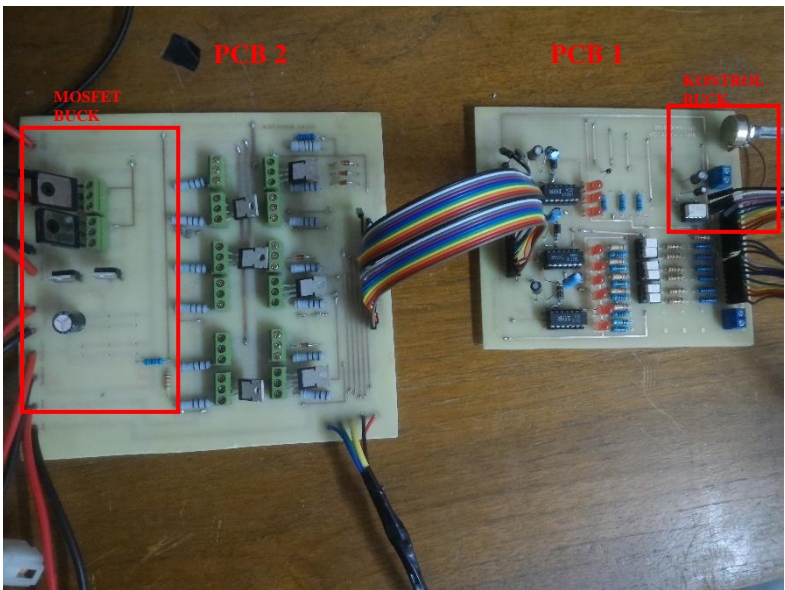
Sedangkan untuk data hasil dari osiloskop sendiri tertera pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Sinyal Tegangan *line to line inverter 3 phase*

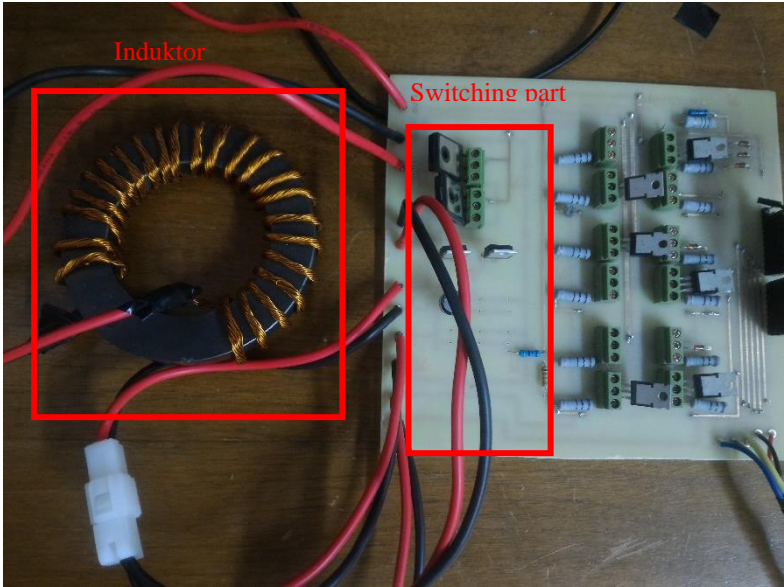
3.7.3 Pengujian *Buck Converter*

Tujuan dari pengujian perangkat keras *buck converter* ini adalah untuk mengetahui tegangan output *buck converter* jika diberi PWM dengan *duty cycle* yang berubah-ubah dan membandingkannya dengan tegangan hasil teori sehingga dapat diketahui berapa nilai error antara pengukuran dan teori sehingga diketahui apakah *buck converter* bekerja baik atau tidak. Gambar 4.9 menunjukkan perangkat keras *buck converter* secara keseluruhan



Gambar 4. 9 *Buck Converter Circuit*

Pada gambar 4.9 PCB 1 terdapat bagian kontrol dan *optocoupler* dari *buck converter*. Dengan menggunakan IC TLP 250 sebagai *optocoupler* dan potentiometer sebagai pengatur besarnya tegangan sesuai yang kita inginkan. Sedangkan pada PCB 2 adalah bagian mosfet, induktor, transistor dioda dan kapasitor untuk *buck converter*. Pada PCB 2 menggunakan mosfet IRF 4332 dan transistor dioda MUR 1560.



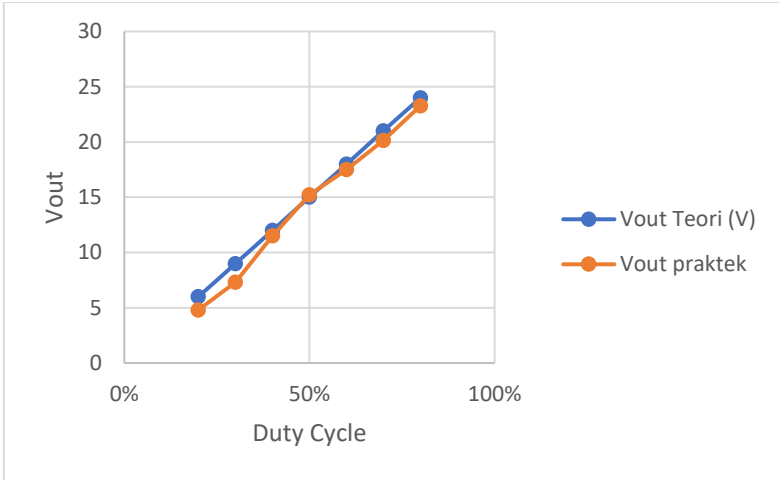
Gambar 4. 10 *Buck converter* PCB 2

Pengujian *buck converter* dilakukan dengan memberikan *duty cycle* PWM antara 20% sampai dengan 80% dengan menggunakan *mikrokontroler* dan frekuensi konstan. Frekuensi dari PWM sebesar 7812.5 Hz. Pengujian ini juga dilakukan secara openloop dengan hanya mengatur *duty cycle* langsung dari arduino, menghasilkan data yang tertera pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data pengujian *Buck Converter* dengan beban R

<i>Buck Converter</i>				
Vin	<i>Duty Cycle</i>	Vout Teori (V)	Vout praktek	Error (%)
30	80%	24	23.28	3.00
30	70%	21	20.13	4.14
30	60%	18	17.5	2.78
30	50%	15	15.2	1.33
30	40%	12	11.5	4.17
30	30%	9	7.3	18.89
30	20%	6	4.8	20.00

Dari tabel 4.3 terlihat bahwa *buck converter* mempunyai error paling kecil pada *duty cycle* 50% yaitu sebesar 1.33%. Namun pada *duty cycle* 20% besarnya error cukup besar yaitu mencapai 20%. Hal ini dikarenakan desain *buck converter* menggunakan *duty cycle* 50%. Berikut ini gambar 4.11 adalah gambar grafik *duty cycle* terhadap V output dari hasil praktek dan teori.

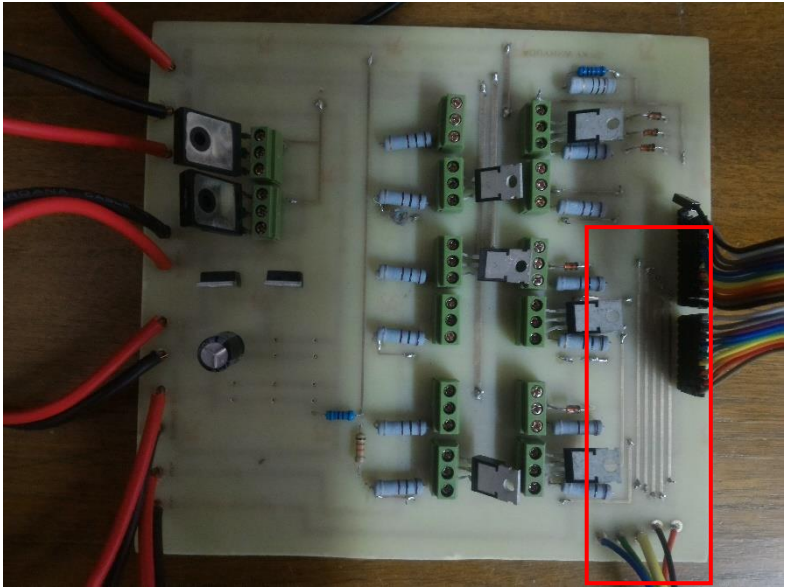


Gambar 4. 11 Grafik dari output tegangan *buck converter* dengan perubahan *duty cycle*

3.7.4 Pengujian *Hall Of Sensor Motor BLDC*

Pada motor BLDC, pensaklaran (switching) inverter 3 fasa ditentukan berdasarkan masukan *hall effect sensor* pada mikrokontroler karena *hall effect sensor* berfungsi untuk mendeteksi magnet permanen pada motor BLDC, sehingga difungsikan sebaga pendeteksi posisi rotor pada motor BLDC yang kemudian dari posisi rotor tersebut digunakan untuk menentukan pensaklaran inverter 3 fasa. Hubungan antara sinyal keluaran *hall effect sensor* dengan pensaklaran inverter sudah dijelaskan pada bab 2 sub-bab inverter tiga fasa. Sinyal keluaran *hall effect sensor* berbentuk data digital yang bernilai 0 atau 1.

Dalam pengujian sinyal keluaran *hall effect sensor*, dibutuhkan rangkaian pembacaan *hall effect sensor* yang sudah dijelaskan pada bab 3 sub-bab perencanaan dan pembuatan rangkaian untuk pembacaan *hall effect sensor*. Hardware dari rangkaian pembacaan *hall effect sensor* ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Jalur *Hall of Sensor* di *PCB 2*

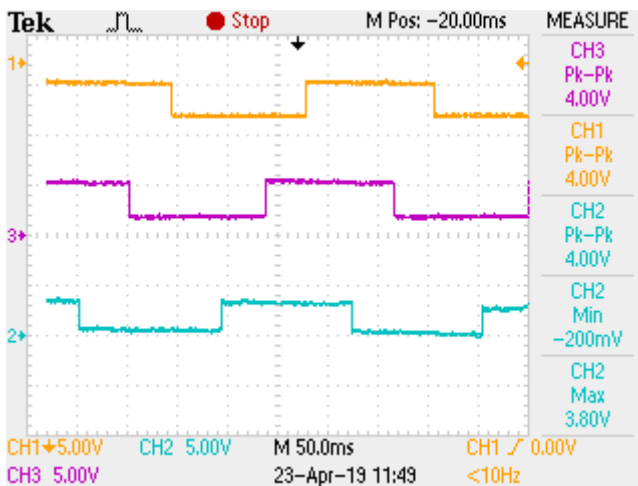
Dalam *hall sensor* sendiri terdapat 5 buah kabel yang mempunyai fungsi berbeda-beda. Dapat dilihat pada gambar warna dari penyalur *hall of sensor* adalah warna merah, hitam, kuning, hijau dan biru. Warna merah dan hitam adalah warna suplai untuk mengaktifkan *hall sensor* di dalam BLDC. Besarnya tegangan dari penyaluran *hall of sensor* bergantung kepada *datasheet* dari motor, dalam hal ini motor BLDC membutuhkan penyaluran *hall sensor* sebesar 5V. Karena itu tegangan 5V diambil dari *mikrokontroler*, kabel merah untuk kutub positif, dan kabel hitam untuk ground. Lalu ketiga kabel yaitu hijau, kuning dan biru adalah kabel *feedback* dari *hall of sensor* yang kemudian masuk ke dalam *mikrokontroler*.

Pada pengujian *hall effect sensor* dibutuhkan osiloskop untuk mengamati sinyal kekeluaran dan dibutuhkan sumber tegangan Vcc yang diambil dari *mikrokontroler* yang digunakan untuk mengaktifkan *hall effect sensor*. Prinsip kerja *hall effect sensor* yaitu saat terdapat perubahan medan magnet, maka *hall effect* akan mengeluarkan tegangan. Pada saat *hall effect sensor* mengeluarkan tegangan, ini berarti sinyal

keluaran *hall effect sensor* dibaca *mikrokontroler* bernilai 1. Saat bernilai 1, tegangan peak yang terlihat di osiloskop sebesar 5 V karena tegangan referensi didapatkan dari tegangan V_{dd} pada *mikrokontroler* sebesar 5 V.

Pada pengujian *hall effect sensor*, dilakukan pemutaran motor untuk menimbulkan perubahan medan magnet (utara & selatan) pada tiap magnet yang terdapat pada rotor motor BLDC, selanjutnya dideteksi oleh *hall effect sensor*. Nilai dari pembacaan *hall effect sensor* yang dibaca oleh input *mikrokontroler* akan bernilai 1 ketika medan magnet (utara) mulai menyentuh *hall effect sensor* dan saat sisi *hall effect sensor* terkena medan magnet (utara) secara penuh. Sedangkan nilai pembacaan *hall effect sensor* pada input *mikrokontroler* akan bernilai 0 ketika medan magnet (selatan) mulai menyentuh *hall effect sensor* dan saat *hall effect sensor* terkena medan magnet (selatan) secara penuh. Dengan demikian sinyal keluaran *hall effect sensor* dapat diamati. Putaran dari motor BLDC bergantung pada kondisi pulsa dari ketiga *hall effect sensor*, yang nantinya digunakan untuk *switching* inverter tiga fasa dengan frekuensi yang sesuai dengan frekuensi sinyal keluaran *hall effect sensor*.

Berikut adalah gelombang sinyal keluaran *hall effect sensor* hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Sinyal Output dari *Hall Effect Sensor*

Pada Gambar 4.13 adalah bentuk respon sinyal keluaran Hall Effect Sensor A (biru), Hall Effect Sensor B (ungu) dan Hall Effect Sensor C (oranye). Sinyal keluaran hall effect sensor A ditunjukkan pada gambar yang terletak di sisi bawah, sinyal keluaran hall effect sensor B ditunjukkan pada gambar yang terletak di sisi tengah, sinyal keluaran *hall effect sensor C* ditunjukkan pada gambar yang terletak di sisi atas.

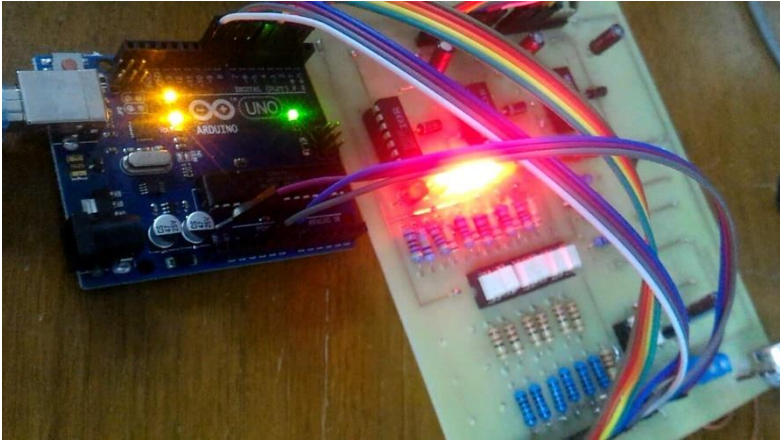
Dari bentuk sinyal yang diperoleh, dapat dilihat bahwa respon sinyal keluaran hall effect memiliki 6 step dari penyulutan mosfet secara berurutan. Jumlah 6 step penyulutan mosfet tersebut tersebut yang disebut sebagai metode six step yang nantinya digunakan untuk penyulutan mosfet pada inverter 3 fasa.

Dari data respon sinyal hall effect sensor pada Gambar 4.9, dapat diamati bahwa urutan *six-step* pwm untuk penyulutan tiap mosfet pada inverter tiga fasa, bergantung pada komutasi dari hall effect sensor, seperti yang dijelaskan pada bab 2 sub-bab 5. Berikut adalah tabel dari *six-step* inverter menggunakan urutan komutasi dari *hall effect sensor* yang ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 *Six-step* menggunakan urutan *commutation hall effect sensor*

Step	Sudut Komutasi	Hall effect Sensor			Pensaklaran mosfet
		A	B	C	
1	60	1	0	0	S1 ; S2
2	120	1	1	0	S2 ; S3
3	180	0	1	0	S3 ; S4
4	240	0	1	1	S4 ; S5
5	300	0	0	1	S5 ; S6
6	360	1	0	1	S6 ; S1

Pada gambar 4.14 terlihat bagaimana saat inputan dari *hall of effect* sensor mengakibatkan jalannya pensaklaran mosfet yang ditunjukkan dengan penyalaan LED.



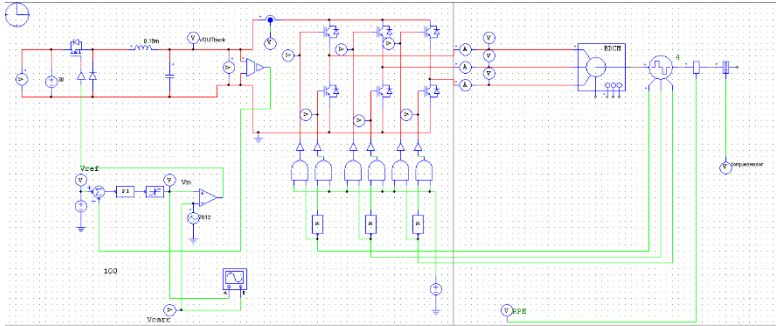
Gambar 4. 14 Nyala LED karena *six-step* komutasi *hall of effect*

3.8 Pengujian Integrasi Sistem

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pengujian integrasi sistem adalah pengujian keseluruhan dari metode *pulse amplitude modulation*. Dalam hal ini terdiri dari *buck converter*, inverter 3 fasa dan *mikrokontroller* bekerja bersama untuk mencapai tujuan berjalannya motor BLDC. Ada dua buah integrasi sistem yaitu dengan simulasi dan alat real sebagai pembanding.

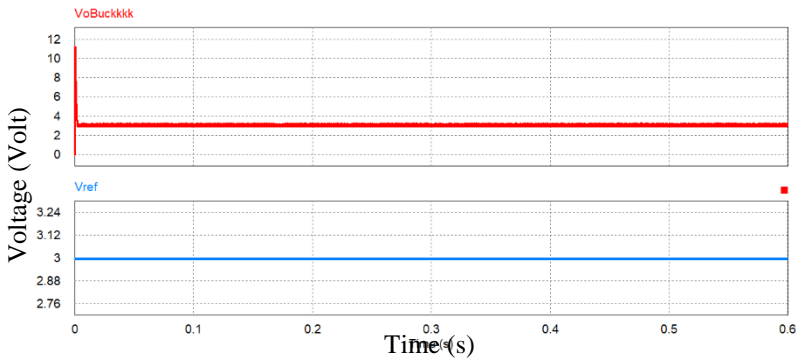
3.8.1 Integrasi Sistem Simulasi

Simulasi yang digunakan adalah menggunakan aplikasi Power Simulator. Dalam hal ini seperti hardwarenya, sistem ini terdiri dari *buck converter* dan inverter 3 fasa. *Buck converter* yang digunakan adalah sistem *close loop* dengan sensor tegangan atau *constant voltage*. Seperti pada gambar 4.16, terdapat $V_{\text{refferensi}}$ yang bertujuan sebagai tegangan acuan dari *buck converter*, sehingga output dari *buck converter* akan menyesuaikan dari besarnya $V_{\text{refferensi}}$ ini. Sebagai contoh apabila V_{out} lebih besar dari $V_{\text{refferensi}}$, maka *duty cycle* pwm yang masuk akan dikurangi sampai hasilnya sama dengan $V_{\text{refferensi}}$. Begitu pula sebaliknya apabila V_{out} lebih kecil dari $V_{\text{refferensi}}$, maka pwm yang masuk ke gate akan bertambah *duty cyclenya* sampai tegangan V_{out} memenuhi.



Gambar 4. 15 Simulasi *Pulse Amplitude Modulation* dengan PSIM

Hasil dari simulasi buck converter constant voltage tertera pada gambar 4.16.



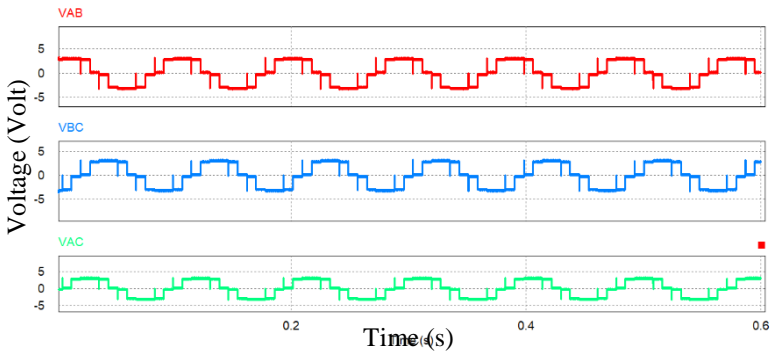
Gambar 4. 16 *buck converter* simulasi *constant voltage* dengan PSIM

Dengan data besarnya tegangan output dan tegangan referensi seperti pada gambar 4.17.

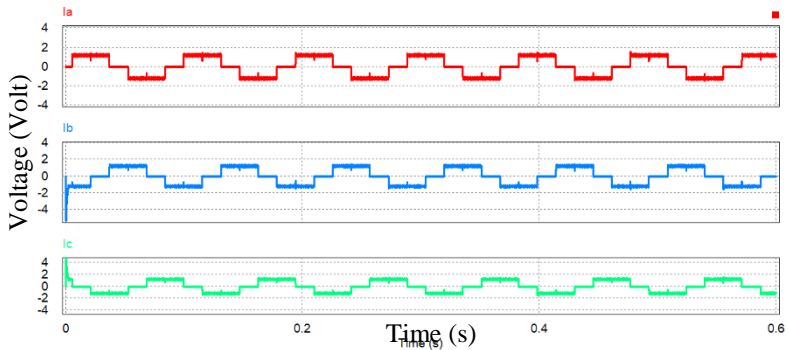
RMS Value	
Time From	1.0000000e-006
Time To	6.0000000e-001
VoBuckkkk	4.1210445e+000
Vref	4.0000000e+000

Gambar 4. 17 Nilai rms Vout dan V referensi dari simulasi dengan PSIM

Setelah keluar dari proses *buck converter*, selanjutnya masuk ke dalam inverter 3 fasa. Dalam hal ini dapat disimulasikan bagaimana bentuk dari tegangan pada tiap-tiap fasa sebelum masuk ke motor dengan koneksi line to line seperti yang terlihat pada gambar 4.18. Selain tegangan juga ada sinyal tiap fasa A, fasa B, dan fasa C dari segi arusnya seperti pada gambar 4.19.



Gambar 4. 18 Sinyal tegangan dari *line to line inverter 3 phase* simulasi PSIM



Gambar 4. 19 Current signal of inverter 3 phase simulation with PSIM

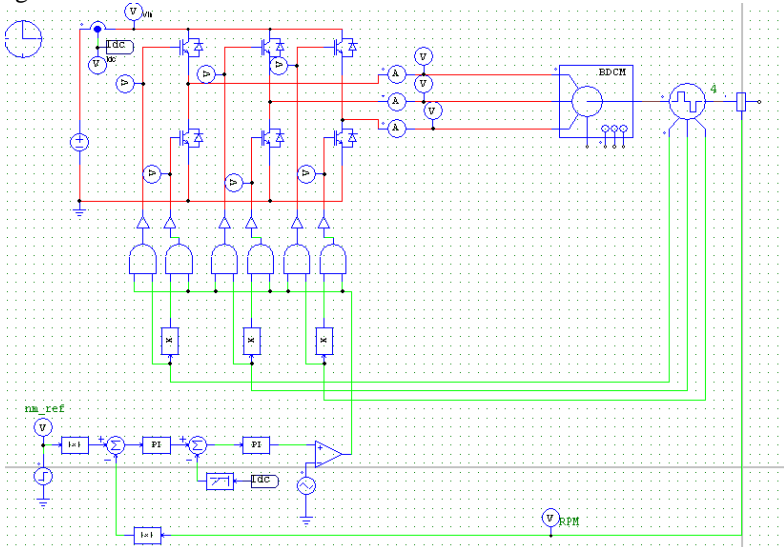
Dengan mengacu kepada tegangan hardware real, maka didapatkan tabel tegangan, arus, dan RPM seperti yang tertera pada tabel 4.5

Tabel 4. 5 Data pengujian simulasi dari integrasi *system* menggunakan metode PAM

Metode PAM			
Vout Buck	Iout Buck	RPM	Pout
2.6	0.8	267	2.08
3	0.82	288	2.46
3.5	1.14	372	3.99
4	1.3	424	5.2
4.7	1.46	474	6.862

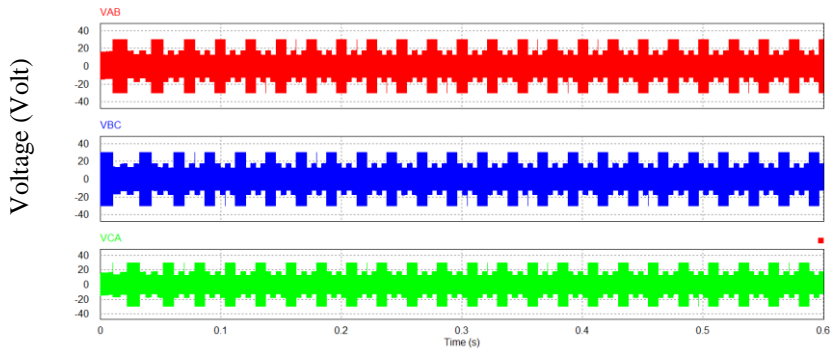
Seperti halnya simulasi sebelumnya, simulasi dengan metode PWM ini menggunakan aplikasi Power Simulation. Dalam hal ini rangkaian yang digunakan adalah menggunakan inverter 3 fasa yang langsung terhubung ke dalam motor BLDC. Perbedaan dari PWM dan PAM adalah pada metode PWM, tegangan input dibuat tetap. Pengaturan tegangan output inverter 3 fasa dilakukan dengan cara memodulasi sinyal switching inverter 3 fasa. Sinyal switching mosfet pada inverter yang

telah dimodulasi dapat diatur lebar pulsanya untuk mengatur tegangan output inverter. Keseluruhan simulasi dari metode PWM dapat dilihat pada gambar 4.20.

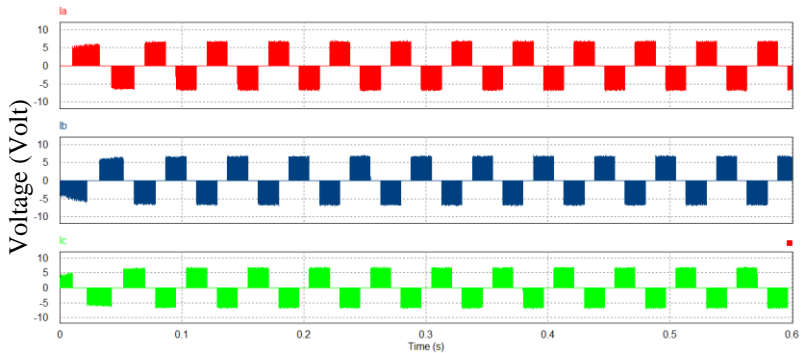


Gambar 4. 20 Simulasi *Pulse Width Modulation* dengan PSIM

Sinyal line to line yang keluar dari inverter ini dapat dilihat seperti pada gambar dan gambar. Gambar 4.21 adalah tegangan line to line dari metode PWM, dan gambar 4.22 adalah arus line to line dari metode PWM.



Gambar 4. 21 Sinyal Tegangan line to line PWM simulasi PSIM



Gambar 4. 22 Sinyal Arus inverter 3 fasa metode PWM dengan PSIM

Dapat dilihat perbedaan dari metode PWM dan PAM adalah bentuk sinyal dari PWM terisi penuh, hal ini disebabkan karena metode PWM mengandalkan switching pada mosfet 3 fasa saja untuk mengatur kecepatan motor BLDC. Tegangan puncak line to line inverter 3 fasa besarnya sama dengan input tegangan sumber.

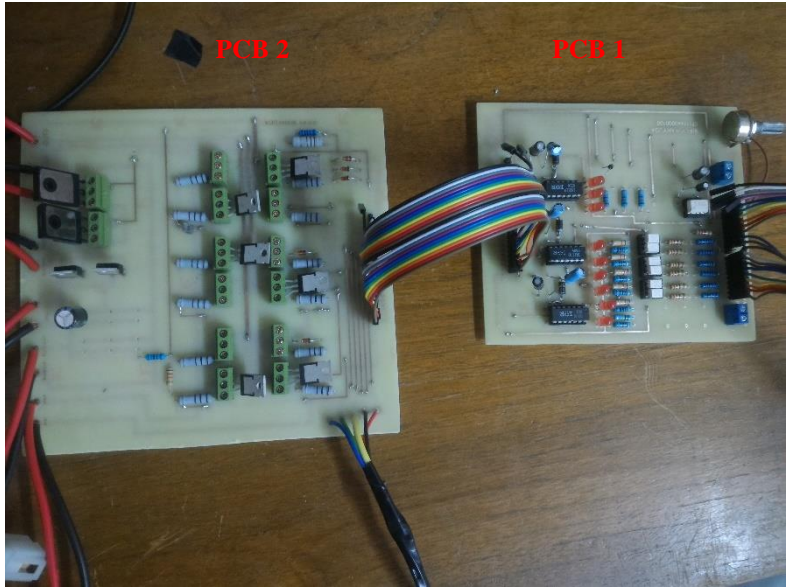
Tabel 4. 6 Data Pengujian Simulasi dari Integrasi Sistem dengan metode PWM

Metode PWM			
Vout Buck	Iout Buck	RPM	Pout
15.5	1.34	267	20.77
15.7	1.36	288	21.352
16.7	1.7	372	28.39
17.08	1.87	424	31.9396
17.37	2.05	474	35.6085

Dari perbandingan kedua metode diatas, dapat ditarik kesimpulan bahwa metode PAM lebih diunggulkan karena dalam metode ini daya output lebih kecil. Ini terjadi karena pada metode PAM peak to peak rms tegangannya berubah-ubah sesuai kebutuhan, sedangkan pada PWM tegangan peak to peaknya sama dengan tegangan input. dari segi ripple baik tegangan dan arus juga terlihat bahwa PAM lebih baik, karena pensaklaran terjadi lebih sedikit dibandingkan dengan metode PWM.

3.8.2 Integrasi Sistem Alat

Integrasi sistem keseluruhan ini meliputi *buck converter* dan inverter 3 fasa dari alat yang dibuat. Dalam hal ini seperti yang terlihat dari gambar 4.23 terdapat dua buah PCB. PCB 1 adalah tempat kontrol setelah keluar dari arduino baik itu *buck converter* maupun inverter 3 fasa, lalu PCB ke 2 adalah tempat pensaklaran mosfet *buck converter* dan inverter 3 fasa. Dalam hal ini *buck converter* juga menggunakan *close loop* dengan menggunakan potentiometer sebagai referensi.



Gambar 4. 23 Keseluruhan *integration system*

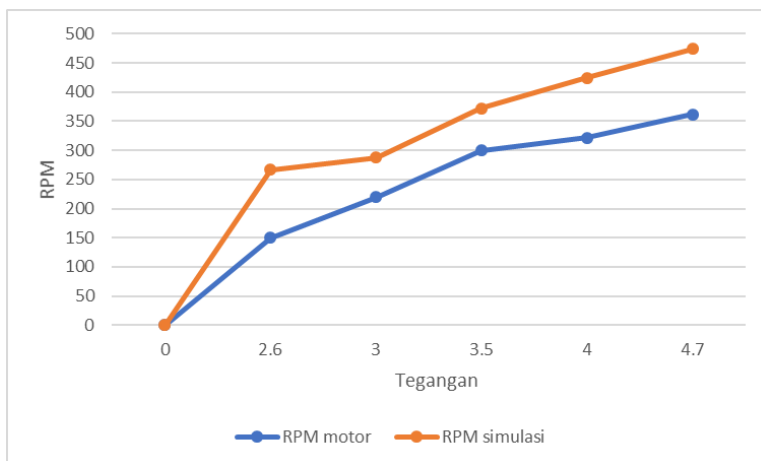
Potentiometer akan terhubung ke A1 dari arduino, lalu sensor tegangan yang menggunakan 2 buah resistor sebagai pembagi tegangan masuk ke A0 dari arduino. Setelah itu secara bertahap tegangan output akan menyesuaikan dari potentiometer dengan mengubah *duty cycle* yang diproses di dalam arduino. Untuk inverter 3 fasa sendiri datanya seperti yang sudah dijabarkan dalam bab 4 tentang pengujian inverter 3 fasa.

Dengan menyambungkan DC source, motor, hall of sensor dan arduino didapatkan hasil seperti yang tertera pada tabel 4.7.

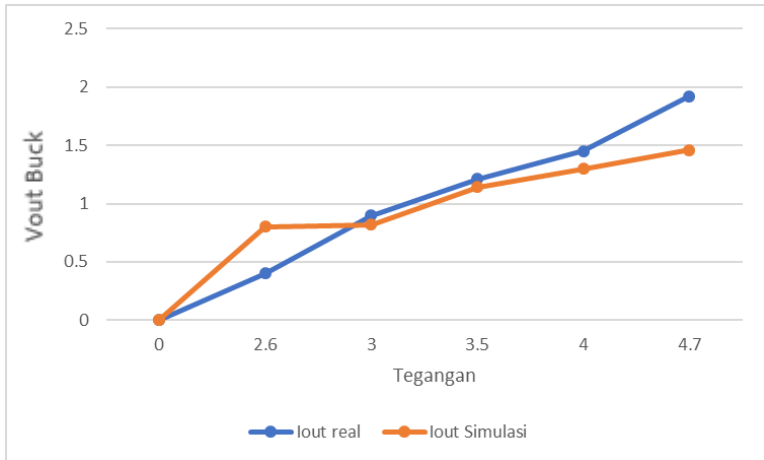
Tabel 4. 7 Data pengujian Integrasi *System PAM method*

Metode PAM			
Vout Buck	Iout Buck	RPM	Pout
2.6	0.4	150	1.04
3	0.9	220	2.7
3.5	1.21	300	4.235
4	1.45	322	5.8
4.7	1.92	362	9.024

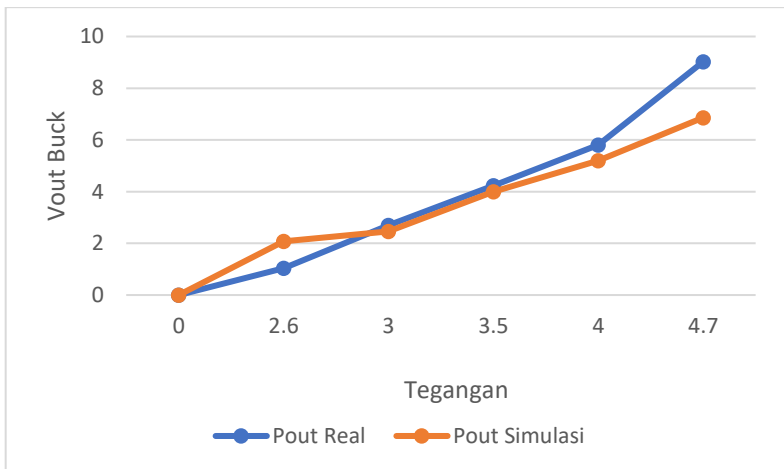
Dari data pengujian simulasi integrasi sistem dengan metode PAM dan data pengujian real integrasi sistem dengan metode PAM dapat digambarkan grafik seperti pada gambar 4.24 antara tegangan buck dan RPM untuk membandingkan kedua data. Lalu grafik kedua pada gambar 4.25 adalah perbandingan antara arus buck dan tegangan. Dan grafik terakhir adalah gambar 4.26 tentang perbandingan daya output dengan tegangan alat.



Gambar 4. 24 Grafik dari Tegangan *Buck converter* dan RPM



Gambar 4. 25 Grafik dari tegangan *buck converter* dan arus *output*



Gambar 4. 26 Grafik dari Tegangan *buck converter* dan output daya

Dari data-data diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa antara simulasi dan real hampir mendekati. Namun bisa dikatakan bahwa pengisian

koefisien pada simulasi belum sesuai dengan motor aslinya karena kendala kurangnya datasheet yang motor. Sehingga simulasi dari motor BLDC ini kurang tepat dari kondisi motor aslinya.

Berikut adalah potongan dari jalannya motor BLDC pada RPM 320 yang diukur dengan tachometer yang diperlihatkan pada gambar 4.24.



Gambar 4.24 *Measurement of RPM motor with tachometer*

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

3.9 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, simulasi dan implementasi sistem dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Efisiensi dari metode *Pulse Amplitude Modulation* dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya efisiensi *buck converter* dan efisiensi inverter 3 fasa.
2. Efisiensi dari metode *Pulse Amplitude Modulation* tidak linier seiring dengan bertambahnya tegangan input.
3. Besar efisiensi dari metode *pulse amplitude modulation* juga bergantung dengan komponen dioda zener inverter 3 fasa dan *bootstrap* kapasitor pada bagian high mosfet inverter 3 fasa.
4. Hasil menunjukkan bahwa simulasi dan pengujian dari sistem pengaturan kecepatan motor BLDC dengan metode PAM sudah berjalan dengan baik, akan tetapi tidak disarankan untuk menggunakan metode ini apabila berdaya besar dan mempunyai range tegangan yang tinggi.

3.10 Saran

1. Dalam perancangan pembuatan induktor pada *buck converter*, dibutuhkan tembaga dan core yang berkualitas baik agar memiliki hasil yang baik. Serta ketelitian dalam pembuatan induktor.
2. Untuk pengembangan lebih lanjut sistem ini, dapat menggunakan DC-DC converter non konvensional yang dapat menurunkan dan menaikkan tegangan secara cepat dan efisiensi tinggi untuk mencapai efisiensi sistem yang baik.
3. Pemilihan dioda zener sebagai pemotong tegangan gate dan bootstrap capacitor harus tepat dan presisi karena berkaitan dengan efisiensi inverter 3 fasa seiring dengan bertambahnya tegangan pada sisi drain.
4. Pemilihan mosfet juga bisa dilakukan dengan memilih mosfet yang memiliki range level tegangan gate penyalan tinggi (lebih dari 20V).

Halaman ini sengaja dikosongkan

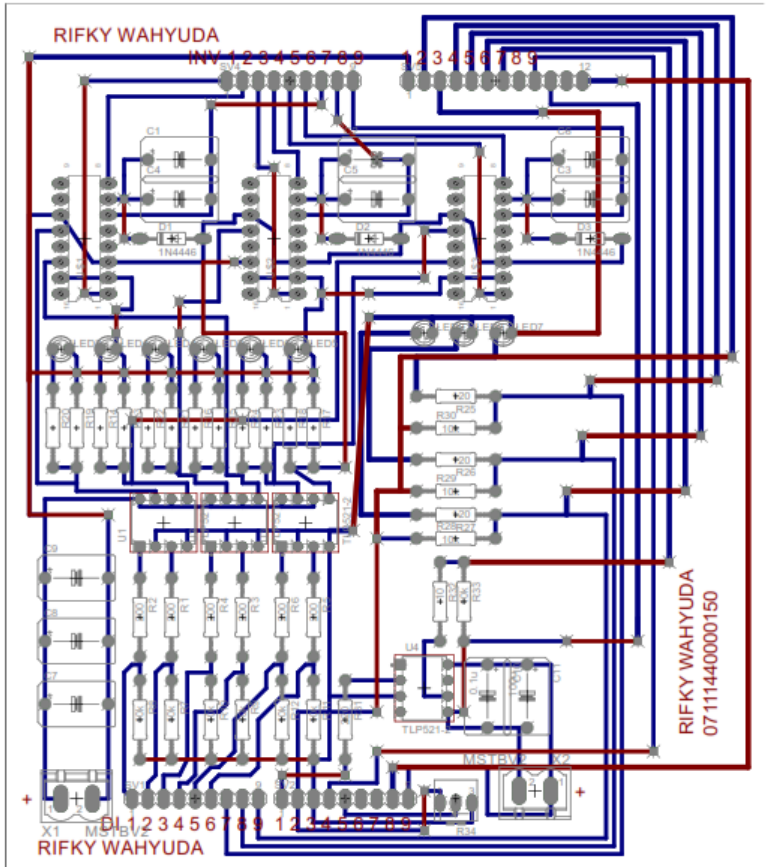
DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Rambabu, "MODELING AND CONTROL OF A BRUSHLESS DC MOTOR," Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, 2007.
- [2] S. A. K. M. Niapour, G. S. Garjan, M. Shafiei, M. R. Feyzi, S. Danyali, and M. B. Kouhshahi, "Review Permanent Magnet Brushless DC Motor Basic Drives Based on Analysis and Simulation Study," *International Review of Electrical Engineering`*, vol. 9, 2014.
- [3] L. K.-Y. Lai. Yen-Shin, Tseng. Jing-Hong, Chen. Yen-Chang, Hsiao. Tse-Liang, "Efficiency Comparison of PWM-Controlled and PAM-Controlled Sensorless BLDCM Drives for Refrigerator Applications," *IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2007.
- [4] M. Azzumar, "Pemodelan dan Simulasi Brushless DC Motor Kecil Untuk Aplikasi Aktuatur Sirip Roket," Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Depok, 2012.
- [5] M. Daputra and Z. Zulwisli, "SIX-STEP INVERTER UNTUK MENGENDALIKAN MOTOR 3 FASA ARUS SEARAH TANPA SIKAT BERBASIS ARDUINO," *Jurnal Vokasional Teknik Elektronika dan Informatika*, vol. 7, pp. 20-29, 2019.
- [6] T. Kenjo, *Permanen Magnet and Brushless DC motor*. Oxford, 1985.
- [7] A. N. 8138, "AVR194: Brushless DC Motor Control Using ATmega32M1," *Atmel Corporation*, p. 3, 2008.
- [8] R. P. Eviningsih, "Pengaturan Konverter DC-DC Bidirectional Dengan MPPT Berbasis Modified Perturbation And Observation Pada Sistem Turbin Angin," Masters, Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, ITSRepository:1923, 2017.
- [9] I. Batarseh, *Power Electronic Circuit*, 2004.
- [10] M. H. Rasyid, *Power Electronics Handbook*, 2001.
- [11] D. T. V. K. a. L.L.B.Sowjanya., "*Speed Performance Of A Bldc Motor Employing Pwm/Pam Control Techniques*," *Ijaiem*, vol. 5, 2016.
- [12] J. Musil, "3-Phase BLDC Drive Using Variable DC Link Six-Step Inverter," *Designer Reference Manual*, vol. 1, 2006.

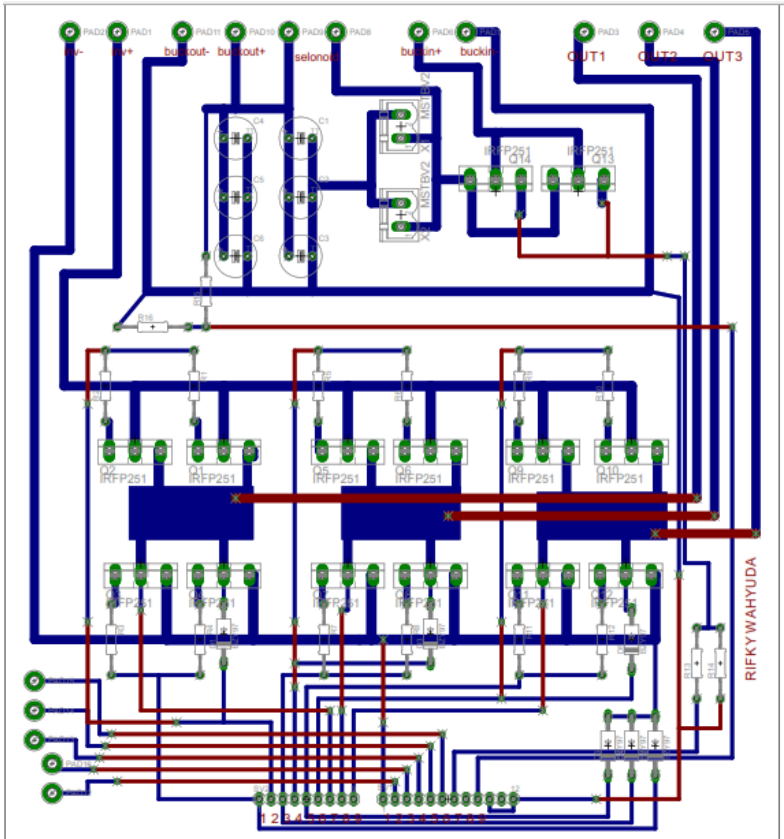
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1. Board Driver mosfet PAM



2. Board Mosfet PAM



BIODATA PENULIS



Terlahir di kota kecil sebelah barat Yogyakarta, kota yang indah yaitu Purworejo pada 13 Oktober 1995. Penulis yang bernama lengkap Rifky Wahyuda, biasa dipanggil Rifky. Penulis yang dibesarkan di Purworejo menempuh pendidikan formal dimulai dari tingkat dasar di SDN Pangen Gudang, dilanjutkan dengan pendidikan tingkat menengah pertama di SMPN 2 Purworejo, pendidikan tingkat lanjut di SMAN 1 Purworejo, dan saat ini sedang menempuh pendidikan Strata 1 di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di kegiatan *event* jurusan dan kampus seperti pada kegiatan EE Event 2014, ITS Expo 2015, ITS Expo 2016, dan ITS Expo 2017 . Penulis juga aktif dalam kegiatan lingkungan dan pemberdayaan masyarakat.