

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGGEREMAN REGENERATIF
BRUSHLESS DC MOTOR MENGGUNAKAN *BIDIRECTIONAL*
VOLTAGE SOURCE INVERTER (VSI)**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**VICTOR ANDREAN
NIM. 125060301111018**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2016



LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN SISTEM Pengereman Regeneratif BRUSHLESS DC MOTOR MENGGUNAKAN *BIDIRECTIONAL* VOLTAGE SOURCE INVERTER (VSI)

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



VICTOR ANDREAN
NIM. 125060301111018

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Juni 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M. Sc.
NIP. 19680122 199512 2 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001



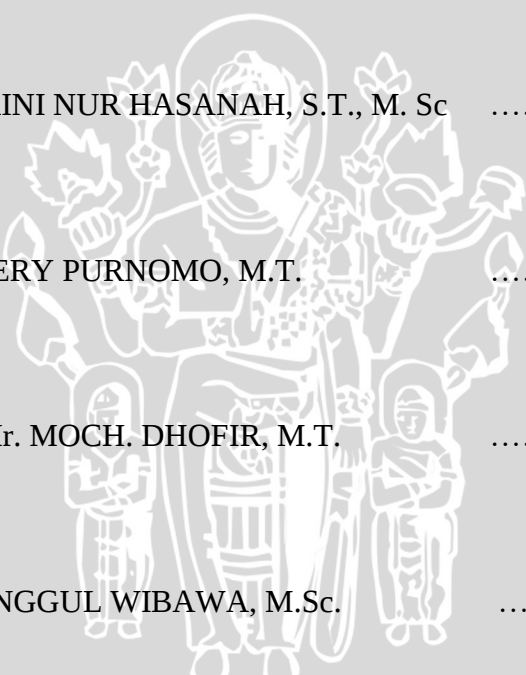
JUDUL SKRIPSI:

RANCANG BANGUN SISTEM Pengereman Regeneratif *BRUSHLESS* DC
MOTOR MENGGUNAKAN *BIDIRECTIONAL VOLTAGE SOURCE INVERTER* (VSI)

Nama Mahasiswa : VICTOR ANDREAN
NIM : 125060301111018
Program Studi : TEKNIK ELEKTRO
Konsentrasi : TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Ir. SOEPRAPTO, M.T.

Anggota : Dr. RINI NUR HASANAH, S.T., M. Sc


TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji 1 : Ir. HERY PURNOMO, M.T.

Dosen Penguji 2 : Drs. Ir. MOCH. DHOFIR, M.T.

Dosen Penguji 3 : Ir. UNGGUL WIBAWA, M.Sc.

Tanggal Ujian : 23 Juni 2016

SK Penguji : No. 781/UN10.6/SK/2016



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juni 2016

Mahasiswa,

VICTOR ANDREAN
NIM. 125060301111018





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada:
Ibunda dan Ayahanda tercinta,
Adik tersayang.*



RINGKASAN

Victor Andrean, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2016, Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif *Brushless* DC Motor Menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI). Dosen Pembimbing: Soeprapto dan Rini Nur Hasanah.

Kendaraan listrik dengan tipe *Plug in Electric Vehicle* (PEV) menggunakan baterai sebagai sumber energinya. Namun, sebagaimana telah diketahui kelemahan utama PEV terletak pada baterai. Efisiensi penggunaan energi baterai yang rendah akan mengakibatkan semakin pendeknya jarak tempuh sebuah kendaraan listrik. Salah satu cara meningkatkan efisiensi penggunaan baterai adalah memanfaatkan regenerasi energi selama proses pengereman elektrik, atau yang lebih dikenal dengan istilah pengereman regeneratif.

Penelitian ini menggabungkan dua macam teknik pengereman elektrik, yaitu pengereman regeneratif, dan pengereman gabungan (regeneratif-plugging) untuk mengatasi kekurangan-kekurangan pada metode pengereman elektrik yang sudah ada sebelumnya. Hanya dengan memainkan urutan pensaklaran pada *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI), maka proses regenerasi energi dapat dilakukan secara efektif, serta dapat mewujudkan torsi pengereman sesuai dengan keinginan pengendara sampai kendaraan berhenti. Tentu saja metode ini akan menjamin kenyamanan pengendara, disamping akan menghemat biaya produksi karena tidak diperlukannya konverter tambahan dalam penerapannya.

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dengan beban inersia mesin dan roda, didapatkan energi rata-rata yang dapat dikembalikan ke baterai adalah sebesar 0,01 Wh untuk kecepatan awal 30 km/jam dan 0,0186 Wh untuk kecepatan awal 40 km/jam. Apabila dibandingkan dengan besar energi kinetik yang dimiliki roda saat berputar, maka didapatkan prosentase energi kinetik yang dapat dikembalikan ke baterai sebesar 41,82% untuk kecepatan awal 30km/jam, dan sebesar 43,74% untuk kecepatan awal 40km/jam.

Kata kunci : *Plug in Electric Vehicle* (PEV), *Brushless* DC Motor, *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI), metode *six-step*, *Regenerative Braking System* (RBS).



SUMMARY

Victor Andrean, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, June 2016, Design of Regenerative Braking System on Brushless DC Motor Using Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI). , Supervisor: Soeprapto and Rini Nur Hasanah.

Plug-in Electric Vehicle (PEV) use a battery as a source of energy. However, as has been known that PEV main weakness lies on the battery. The lower energy usage efficiency of the battery, the shorter distance of an electric vehicle can be taken. One way to improve the efficiency of the battery is utilizing energy regeneration during braking electrical, or better known as regenerative braking.

This study combines two kinds of electrical braking techniques, namely regenerative braking and combined braking (regenerative-plugging) to overcome the deficiencies in the electrical braking method that already exists. Only by changing the sequence of switching on Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI), then the process of energy regeneration can be done effectively, and can generate the braking torque according to the rider desires until the vehicle stops. Of course, this method will ensure the comfort of the rider, besides saving production costs because it is not needed additional converters in its application.

Based on test results with a load inertia of the engine and the wheels, it is obtained average energy that can be returned to the battery is 0.01 Wh for the initial speed of 30 km/h and 0.0186 Wh for the initial speed of 40 km/h. If it is compared to a kinetic energy that wheel has while rotating, so the percentage of kinetic energy that can be returned to the battery is 41.82% for the initial speed speed of 30km/h, and 43.74% for the initial speed of 40km/h.

Keywords: Plug in Electric Vehicle (PEV), Brushless DC Motor, Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI), six-step method, Regenerative Braking System (RBS).



PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga skripsi yang berjudul **“Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif Brushless DC Motor Menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI)”** dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Program Teknik Energi Elektrik Universitas Brawijaya Malang.

Melalui kesempatan ini, dihaturkan rasa terima kasih dan penghargaan yang sebesar besarnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik, antara lain:

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., ST., Msc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik yang telah banyak memberikan pengarahan, bimbingan, nasehat, saran serta motivasi.
4. Bapak Ir. Soeprapto, M.T. dan Ibu Rini Nur Hasanah, Dr., ST., Msc. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
5. Ibu Sapriesty Nainy Sari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan, nasehat dan motivasi yang telah diberikan.
6. Kepala Laboratorium Elektronika Daya, Kepala Laboratorium Sistem Daya Elektrik, dan Kepala Laboratorium Mesin Elektrik Brawijaya atas segala alat serta sarana dan prasarana yang dimanfaatkan dalam melakukan penelitian ini.
7. Keluarga tercinta, kedua orang tua Untung Wasito dan Sinarwati yang selalu memberikan kasih sayang, doa, serta dukungan moril dan materiil. Adik tercinta Olivia Ferlita atas dukungan dan semangatnya.
8. Teman-teman Laboratorium Elektronika Daya: Samid, Hari, Falah, Rizky, Panji, serta semua aslab 2013 yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.
9. Mas-mas senior: Joko, Arizky, dan Irham atas semua saran-saran yang sangat bermanfaat.
10. Teman-teman yang ikut membantu: Roni, Guntoro, M.Ardito.

11. Keluarga besar Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya angkatan 2011, 2012 dan 2013 yang telah memberikan motivasi dan dukungan.

12. Keluarga besar POWER angkatan 2012, dan teman-teman angkatan 2012 “VOLTAGE”, atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan dalam penelitian ini.

13. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Dapat disadari bersama bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, diharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca sekalian.

Malang, 20 Juni 2016

Penulis



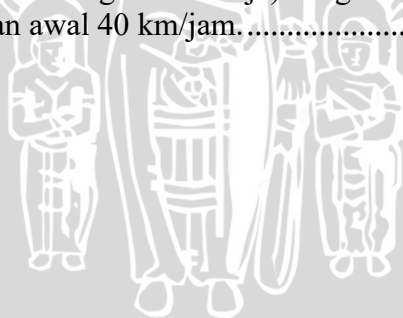
DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah.....	3
1.3 Batasan masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Motor BLDC	7
2.1.1 Konstruksi <i>Brushless</i> DC (BLDC) Motor	8
2.1.2 Metode <i>six-step</i> PWM dan Prinsip kerja motor BLDC.....	9
2.1.3 Model motor BLDC	11
2.2 <i>Bidirectional Voltage Source Inverter</i> (VSI)	15
2.2.1 VSI dalam mode akselerasi	18
2.2.2 VSI dalam mode regeneratif.....	19
2.2.3 VSI dalam mode Regeneratif- <i>plugging</i>	21
2.3 Perhitungan <i>Ripple</i> VSI.....	24
2.3.1 Mode Regeneratif	24
2.3.2 Mode Regeneratif- <i>plugging</i>	25
2.3.3 <i>Ripple Freewheeling Diode</i>	26
2.4 Kontroler.....	27
2.4.1 Kontroler Proporsional	28
2.4.2 Kontroler Integral	28
2.4.3 Kontroler <i>Derivative</i>	29
2.4.4 Kontroler PID	30
2.5 MOSFET	30
2.6 <i>MOSFET Gate Driver</i> (MGD)	32
2.7 Mikrokontroler Arduino Mega	33
2.8 <i>Liquid Crystal Display</i> (LCD).....	34
2.9 Sensor efek medan (<i>Hall Sensors</i>).....	35
2.10 Media penyimpanan energi listrik	36

2.11 Sensor arus.....	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Studi literatur.....	39
3.2 Perancangan Alat.....	39
3.3 Simulasi.....	41
3.4 Pembuatan alat.....	41
3.5 Pengujian dan analisis alat.....	41
3.6 Pengambilan kesimpulan.....	43
BAB IV PERANCANGAN, SIMULASI, DAN PEMBUATAN ALAT.....	45
4.1 Perancangan sistem.....	45
4.2 Perancangan perangkat keras.....	47
4.2.1 Perancangan mekanik <i>prototype</i> sistem pengereman regeneratif.....	47
4.2.2 Perancangan rangkaian elektronika.....	48
4.2.3 Perancangan <i>inverter</i> tiga fasa <i>six step</i>	50
4.2.4. Penentuan frekuensi <i>switching</i> dan kapasitor <i>DC-link</i>	52
4.3 Perancangan perangkat lunak.....	54
4.3.1 Pembacaan arus jangkar.....	54
4.3.2 Algoritma pensaklaran <i>Voltage Source Inverter</i>	55
4.3.3 Algoritma <i>Regenerative Braking System</i>	56
4.4 Simulasi.....	58
4.4.1 Mikrokontroler.....	58
4.4.2 VSI sebagai RBS.....	60
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS.....	67
5.1 Pengujian <i>Back-EMF</i> motor BLDC.....	67
5.2 Pengujian sensor arus.....	69
5.3 Pengujian parameter motor BLDC.....	71
5.4 Pengujian sensor efek medan (<i>Hall Sensors</i>) pada motor BLDC.....	73
5.5 Pengujian sinyal picu Mikrokontroler.....	75
5.6 Pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran RBS.....	77
5.7 Pengujian RBS secara <i>open loop</i>	80
5.8 Pengujian RBS secara <i>closed loop</i>	82
5.9 Pengujian regenerasi energi.....	85
5.9.1 Pengereman lengkap.....	86
5.9.2 Pengereman regeneratif saja.....	90
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
DAFTAR PUSTAKA.....	95
LAMPIRAN.....	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 I/O LCD	35
Tabel 2.2 Fungsi pin Sensor Arus ACS712	38
Tabel 4.1 Daftar penggunaan pin ATmega2560.....	48
Tabel 4.2 Spesifikasi Motor BLDC	52
Tabel 4.3 Perhitungan kapasitor kompensasi <i>ripple freewheeling</i> dioda.....	53
Tabel 4.4 Timing komutasi pada mode regeneratif	55
Tabel 4.5 Timing komutasi pada mode regeneratif-plugging.....	55
Tabel 4.6 Ia terhadap D mode regeneratif.	62
Tabel 4.7 Ia terhadap D mode Regeneratif-plugging	65
Tabel 5.1 Pengujian Back EMF motor BLDC.....	68
Tabel 5.2 Data pengujian sensor arus.	70
Tabel 5.3 Pengujian parameter motor BLDC	72
Tabel 5.4 Pengujian RBS dengan beban $R=60\ \Omega$, mode regeneratif.....	78
Tabel 5.5 Pengujian RBS dengan beban $R=60\ \Omega$ mode regeneratif-plugging.	78
Tabel 5.6 Pengujian RBS dengan beban baterai 48V, mode regeneratif.	81
Tabel 5.7 Pengujian RBS dengan beban baterai 48V, mode regeneratif-plugging.....	81
Tabel 5.8 Pengujian RBS secara <i>closed loop</i> dalam mode regeneratif.	83
Tabel 5.9 Pengujian RBS secara <i>closed loop</i> dalam mode regeneratif-plugging.	84
Tabel 5.10 Pengujian RBS dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.	87
Tabel 5.11 Pengujian RBS dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.	87
Tabel 5.12 Pengujian RBS (pada mode regeneratif saja) dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.....	90
Tabel 5.13 Pengujian RBS (pada mode regeneratif saja) dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 40 km/jam.....	90



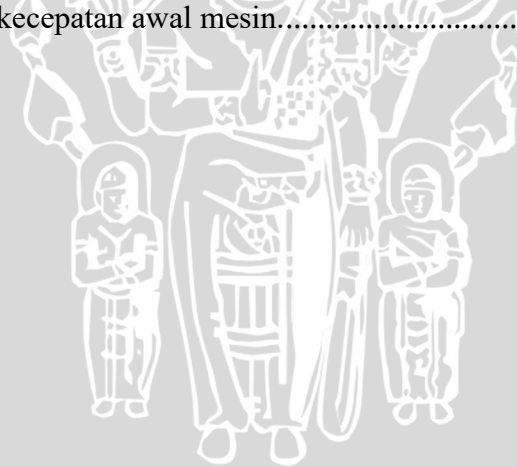


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kurva perbandingan tegangan input-output boost converter terhadap <i>duty cycle</i>	2
Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC.	8
Gambar 2.2 Bentuk rotor dan stator motor BLDC (a) <i>outrunner</i> (b) <i>inrunner</i>	8
Gambar 2.3 Sinyal <i>Hall sensors</i> dan tegangan 3 fasa <i>square</i>	9
Gambar 2.4 Prinsip kerja motor BLDC.....	10
Gambar 2.5 Pemodelan skematik rangkain motor BLDC.	11
Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen satu fasa motor BLDC.....	11
Gambar 2.7 Kurva karakteristik Daya, Torsi vs Putaran	13
Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen VSI sebagai driver motor BLDC.	16
Gambar 2.9 Gelombang <i>Back EMF</i> tegangan AC 3 fasa.	16
Gambar 2.10 Gelombang 3 fasa setelah disearahkan oleh <i>freewheeling</i> dioda.	17
Gambar 2.11 Gelombang arus pada belitan jangkar motor.....	17
Gambar 2.12 Aliran arus saat mode akselerasi.....	18
Gambar 2.13 Ilustrasi <i>Back EMF</i> , <i>Hall Sensors</i> , dan sinyal picu pada mode akselerasi. ...	18
Gambar 2.14 Aliran arus saat mode regeneratif.....	19
Gambar 2.15 Ilustrasi <i>Back EMF</i> , <i>Hall Sensors</i> , dan sinyal picu pada mode akselerasi. ...	19
Gambar 2.16 Aliran arus saat mode regeneratif-plugging.....	21
Gambar 2.17 Ilustrasi <i>Back EMF</i> , <i>Hall Sensors</i> , dan sinyal picu pada mode akselerasi. ...	22
Gambar 2.18 Proses kerja sistem pengereman regeneratif secara terpisah.	26
Gambar 2.19 Diagram Blok Kontroler Proporsional.....	28
Gambar 2.20 Diagram Blok Kontroler Integral.....	29
Gambar 2.21 Diagram Blok kontroler <i>Derivative</i>	29
Gambar 2.22 Diagram Blok Kontroler PID.....	30
Gambar 2.23 Simbol Transistor MOSFET Mode Enhancement. (a) N-Channel Enhancement (b) P-Channel Enhancement.....	31
Gambar 2.24 Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah (a) <i>cut-off</i> . (b) saturasi.....	31
Gambar 2.25 Blok diagram IR2110.....	32
Gambar 2.26 Arduino Mega 2560	33
Gambar 2.27 Rangkaian <i>Interface</i> ke LCD Karakter 2X16.	34
Gambar 2.28 Perubahan kombinasi sensor dengan polaritas tegangan tiap fasa.	36
Gambar 2.29 Penampang rotor dengan pemasangan hall sensor.....	36
Gambar 2.30 Konfigurasi pin sensor arus ACS 712.....	37
Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian.....	39
Gambar 3.2 Skematik keseluruhan sistem.....	40
Gambar 4.1 Skematik keseluruhan sistem.....	45
Gambar 4.2 Diagram blok sistem secara keseluruhan.....	46
Gambar 4.3 (a) Model Prototype dalam tiga dimensi. (b) perbandingan diameter gigi.....	47
Gambar 4.4 Rangkaian suplai tegangan 5V.....	48
Gambar 4.5 Rangkaian <i>open collector hall effect</i>	49
Gambar 4.6 MOSFET IRF3710.	50
Gambar 4.7 Rangkaian <i>inverter</i> (a) fasa A, (b) fasa B, (c) fasa C.....	51
Gambar 4.8 Diagram alir proses pembacaan arus.	54
Gambar 4.9 Proses pembangkitan sinyal PWM dengan metode <i>phase and frequency correct</i>	56
Gambar 4.10 Alur kerja program pada mikrokontroler.	57
Gambar 4.11 Simulasi keluaran sinyal pada mikrokontroler.....	58

Gambar 4.12 Bentuk sinyal <i>Hall sensors</i> .	58
Gambar 4.13 Bentuk sinyal pemicuan pada mode Regeneratif.	59
Gambar 4.14 Bentuk sinyal pemicuan pada mode Regeneratif- <i>plugging</i> . (a) S1, S4, S3, S6 (b) S5,S2.	59
Gambar 4.15 Rangkaian simulasi VSI dalam mode Regeneratif menggunakan MATLAB.	60
Gambar 4.16 Urutan pensaklaran S4, S6, S2 pada pengereman mode regeneratif.	60
Gambar 4.17 (a) Bentuk tegangan terminal jangkar (b) Bentuk arus jangkar fasa A untuk <i>duty cycle</i> 70%.	61
Gambar 4.18 (a) arus pada kapasitor DC-link. (b) arus pada resistor 60 ohm (c) tegangan pada resistor 60 ohm.	61
Gambar 4.19 Karakteristik I_a terhadap D , $V_{emf,L-L}=10V$, mode regeneratif.	62
Gambar 4.20 Karakteristik V_o terhadap D , $V_{emf,L-L}=10V$, mode regeneratif.	62
Gambar 4.21 Rangkaian simulasi VSI dalam mode Regeneratif- <i>plugging</i> menggunakan Matlab.	63
Gambar 4.22 Urutan pensaklaran S1, S3, S5, S4, S6, S2 pada mode regeneratif- <i>plugging</i> .	63
Gambar 4.23 Proses peralihan pensaklaran dari S5-S4 menjadi S5-S6.	64
Gambar 4.24 Bentuk arus jangkar fasa A <i>dutycycle</i> 30%, $V_{emf,L-L}=10V$.	64
Gambar 4.25 (a) arus kapasitor, (b) arus masuk baterai (I_o), (c)Tegangan terminal baterai (V_o).	64
Gambar 4.26 Karakteristik I_a terhadap D , $V_{emf,L-L}=10V$, mode Regeneratif- <i>plugging</i> .	65
Gambar 4.27 Karakteristik V_o terhadap D , $V_{emf,L-L}=10V$, Regeneratif- <i>plugging</i> .	65
Gambar 5.1 Rangkaian pengujian <i>Back-EMF</i> motor BLDC.	67
Gambar 5.2 Karakteristik <i>Back EMF</i> terhadap putaran motor (dalam rpm)	69
Gambar 5.3 Rangkaian pengujian sensor arus.	69
Gambar 5.4 Karakteristik tegangan puncak keluaran sensor arus terhadap besar arus AC.	70
Gambar 5.5 Tegangan keluaran sensor arus, untuk arus efektif 5.04 A	71
Gambar 5.6 Rangkaian pengujian parameter motor BLDC.	71
Gambar 5.7 Rangkaian pengujian <i>Hall sensors</i> .	73
Gambar 5.8 Sinyal keluaran sensor efek medan 1,2 dan 3.	73
Gambar 5.9 Gelombang V_{An} (biru) dan sinyal <i>Hall sensor</i> 1 (kuning).	74
Gambar 5.10 Gelombang V_{Bn} dan sinyal <i>Hall sensor</i> 1.	74
Gambar 5.11 Bentuk gelombang V_{AB} (biru) dan sinyal keluaran <i>Hall sensor</i> 2.	75
Gambar 5.12 Sinyal pensaklaran LO 1 dengan frekuensi 61,8 Hz.	75
Gambar 5.13 Sinyal PWM keluaran MGD	76
Gambar 5.14 Urutan sinyal picu S1 dan S2 pada mode Regeneratif- <i>plugging</i> .	76
Gambar 5.15 PWM S1 dan S6 pada mode regeneratif- <i>plugging</i>	76
Gambar 5.16 Rangkaian pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran.	77
Gambar 5.17 Karakteristik arus jangkar terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif, beban resistor 60 Ω .	78
Gambar 5.18 Karakteristik tegangan keluaran DC (V_o) terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif, beban resistor 60 Ω .	79
Gambar 5.19 Karakteristik arus jangkar terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif- <i>plugging</i> , beban resistor 60 Ω .	79
Gambar 5.20 Karakteristik tegangan keluaran DC (V_o) terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif- <i>plugging</i> , beban resistor 60 Ω .	80
Gambar 5.21 Rangkaian pengujian RBS secara <i>open loop</i> .	80
Gambar 5.22 Karakteristik arus jangkar terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman	

regeneratif, beban beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10V$	81
Gambar 5.23 Karakteristik arus keluaran (I_o) terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif, beban beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10V$	82
Gambar 5.24 Karakteristik arus jangkar terhadap <i>duty cycle</i> pada mode pengereman regeneratif- <i>plugging</i> , beban beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10V$	82
Gambar 5.25 Rangkaian RBS secara <i>closed loop</i>	83
Gambar 5.26 Karakteristik arus jangkar terhadap putaran motor, mode regeneratif.	84
Gambar 5.27 Karakteristik arus jangkar terhadap putaran motor, mode regeneratif- <i>plugging</i>	84
Gambar 5.28 Rangkaian pengujian regenerasi energi.	85
Gambar 5.29 Bentuk gelombang tegangan (a) dan arus (b) pada baterai VRLA 12V 100Ah X 4 (seri) dengan <i>setpoint</i> 4A dan kecepatan awal 30 km/jam.	86
Gambar 5.30 Karakteristik waktu pengereman terhadap <i>setpoint</i> , dengan variasi kecepatan awal mesin.	87
Gambar 5.31 Karakteristik daya rata-rata pengereman terhadap <i>setpoint</i> , dengan variasi kecepatan awal mesin.	88
Gambar 5.32 Karakteristik energi pengereman elektrik terhadap <i>setpoint</i> , dengan variasi kecepatan awal mesin.	88
Gambar 5.33 Kurva kecepatan terhadap waktu pada proses perlambatan.	89
Gambar 5.34 Karakteristik waktu pengereman terhadap <i>setpoint</i> (mode regeneratif saja), dengan variasi kecepatan awal mesin.	90
Gambar 5.35 Karakteristik daya rata-rata pengereman terhadap <i>setpoint</i> (mode regeneratif saja), dengan variasi kecepatan awal mesin.	91
Gambar 5.36 Karakteristik energi pengereman (mode regeneratif saja) terhadap <i>setpoint</i> , dengan variasi kecepatan awal mesin.	91





DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Listing Program	98
Lampiran 2	Gambar alat	101
Lampiran 3	Perhitungan nilai frekuensi pensaklaran MOSFET dan nilai kapasitor kompensasi <i>ripple</i> tegangan keluaran.	103
Lampiran 4	Gelombang arus dan tegangan masukan baterai saat pengereman	106
Lampiran 5	Gelombang pensaklaran Inverter, <i>Hall Sensors</i> , <i>Back EMF</i> , tegangan dan arus jangkar pengereman.	109
Lampiran 6	Data numerik arus dan tegangan masukan baterai saat pengereman elektrik	111
Lampiran 7	<i>Datasheet</i> komponen VSI yang digunakan	121





BAB I

PENDAHULUAN

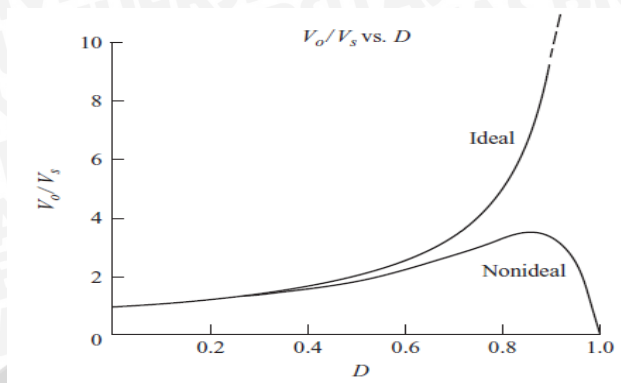
1.1 Latar Belakang

Persediaan BBM yang semakin menipis, diikuti dengan melambungnya harga BBM membuat kendaraan listrik/ *Electric Vehicle* (EV) mendapat perhatian lebih untuk dikembangkan dibandingkan dengan *Internal Combustion Engine* (ICE) vehicles. Berbagai macam pertimbangan lain seperti lebih efisien, bebas emisi, tidak bising, serta lebih nyaman menjadikan kendaraan listrik sebagai alternatif yang menjanjikan di masa mendatang. Kendaraan listrik dengan tipe *Plug in Electric Vehicle* (PEV) menggunakan baterai sebagai sumber energinya. Namun, sebagaimana telah diketahui kelemahan utama PEV terletak pada baterai. Energi listrik yang dapat disimpan dalam suatu baterai masih sangat terbatas, sehingga jarak tempuh kendaraan listrik juga akan sangat terbatas. EVs konvensional menggunakan sistem rem mekanik untuk melakukan proses perlambatan kendaraan. Namun dari sudut pandang efisiensi energi, pengereman mekanik akan membuang energi kinetik EVs menjadi panas melalui kampas rem. Salah satu upaya peningkatan efisiensi penggunaan energi baterai adalah dengan cara mengembalikan energi tersebut ke baterai selama proses pengereman/ perlambatan. Proses ini dikenal dengan istilah pengereman regeneratif. Pengereman regeneratif dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi serta meningkatkan jarak tempuh dari EVs, yang tentunya tidak mungkin dilakukan pada ICE. Penerapan sistem pengereman elektris juga dapat menurunkan periode penggantian dan perawatan kampas rem mekanik.

Sejauh ini, telah muncul berbagai macam metode pengereman regeneratif pada EV antara lain dengan penambahan *Boost Converter* (Hariyanto, A., E., 2015:1-7), metode *Energy Storage System* (ESS) menggunakan *Ultracapacitor* (Lu, S., Corzine, K.A. & Ferdowsi, M., 2007:1516-1523), atau dengan metode *Electronic Gearshift* (Yang, Y.P. & Hu, T.H., 2007:4419-4424). Masing-masing metode tersebut memiliki kelebihan di satu sisi, namun terdapat kelemahan di sisi lain.

Penggunaan *Boost Converter/ DC/DC converter* hanya efektif dilakukan untuk rentang kecepatan tertentu saja, namun pada kecepatan yang relatif rendah, rem elektrik seolah-olah menjadi “blong”. Hal ini disebabkan karena GGL-lawan (*Back-EMF*) yang dihasilkan BLDC akan semakin kecil, sehingga akan sulit untuk menaikkan level tegangan *GGL-lawan* menjadi lebih tinggi dari baterai. Disisi lain *Boost converter* juga akan mengalami kenaikan yang tidak stabil, atau bahkan kejenuhan pada kondisi *dutycycle* di atas dari 90 %, sehingga akan sulit mencapai torsi pengereman yang diinginkan, terutama jika

torsi pengereman yang diinginkan relatif besar. Gambar 1.1 menunjukkan bagaimana *Boost converter* tidak dapat lagi meningkatkan tegangan (mengalami kejenuhan).



Gambar 1.1 Kurva perbandingan tegangan input-output *Boost converter* terhadap *duty cycle*.
Sumber: Hart (2011:220)

untuk mengatasi hal ini biasanya digunakan tuas rem ganda, yaitu tuas rem elektrik untuk melakukan perlambatan dan tuas rem mekanik untuk melakukan pengereman pada kecepatan rendah hingga berhenti. Hal ini dirasa kurang praktis dan berbahaya dalam situasi pengereman mendadak. Penambahan DC/DC *converter* tidak hanya menyebabkan biaya produksi meningkat akibat adanya konverter tambahan, namun juga menurunkan efisiensi akibat disipasi daya pada konverter tambahan.

Metode lainnya adalah penggunaan *ultracapacitor* untuk menyimpan sementara energi pengereman. Metode ini menggunakan tambahan *power switch* untuk mewujudkan pengereman regeneratif. Sistem ini juga membutuhkan sensor untuk mendeteksi apakah *ultracapacitor* telah penuh, sehingga rangkaian tambahan untuk *discharging* digunakan untuk mencegah *overcharging* pada pengereman selanjutnya. Secara implementasi sistem ini akan membutuhkan pengaturan yang sulit, disamping harga *ultracapacitor* yang mahal.

Metode yang lain lagi adalah menggunakan *Electronic Gearshift technology* untuk melakukan pengereman regeneratif. Pada sistem ini motor harus disesain khusus, yang mana terdapat beberapa belitan yang dapat dikoneksikan seri ataupun paralel sesuai dengan kebutuhan torsi. Untuk proses pengereman regeneratif, belitan akan dihubungkan seri, sehingga GGL-lawan akan semakin besar. Namun demikian GGL-lawan masih tetap akan lebih kecil dari tegangan baterai, sehingga tetap dibutuhkan *ultracapacitor* sebagai penyimpan energi sementara.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa metode-metode pengereman tersebut akan menyebabkan meningkatnya biaya produksi akibat penambahan komponen, menurunkan efisiensi akibat disipasi daya pada konverter tambahan, membutuhkan design motor khusus dan kontrol yang rumit, serta menyebabkan pengendara kesulitan dalam

mengoperasikannya.

Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem pengereman regeneratif (*Regenerative Braking System*) menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI). Hanya dengan memainkan urutan *switching* VSI berdasarkan sinyal yang diberikan *Hall sensors* BLDC, maka BLDC dapat dioperasikan pada mode *motoring* dan mode *braking* pada semua variasi kecepatan bahkan hingga berhenti. Dengan demikian, kekurangan-kekurangan yang ada pada metode pengereman sebelumnya dapat terselesaikan.

Teknik pengereman elektrik dalam penelitian ini menggunakan 2 (dua) mode pengereman yaitu Regeneratif murni dan kombinasi Regeneratif-Plugging. Sepanjang mode Regeneratif dapat menghasilkan torsi pengereman yang diinginkan, maka mode ini akan secara otomatis diterapkan oleh sistem. Namun, untuk kecepatan yang relatif rendah, dimana mode Regeneratif murni tidak mampu menghasilkan torsi pengereman yang diinginkan, maka sistem secara otomatis akan menerapkan mode kombinasi Regeneratif-plugging. Dengan teknik ini torsi pengereman dapat dijaga konstan sesuai dengan yang diinginkan, mengurangi biaya produksi karena tidak diperlukannya konverter tambahan ataupun desain motor yang khusus, tidak terdapat rugi-rugi pada konverter tambahan, serta menjamin kenyamanan pengendara.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan pada latar belakang, maka rumusan masalah yang dapat disusun adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan *Regeneratif Braking System* (RBS) menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI).
2. Bagaimana cara mewujudkan torsi pengereman sesuai dengan yang diinginkan pada semua variasi kecepatan.
3. Bagaimana karakteristik kerja VSI sebagai RBS.
4. Berapa besar energi kinetik yang dapat dikembalikan ke baterai.

1.3 Batasan masalah

Agar penelitian yang dilakukan dapat lebih fokus, maka diambil beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan motor BLDC dengan tegangan 48 V, daya 2000 W.
2. Menggunakan baterai tipe VRLA (*valve regulated lead acid*), 12V, 100Ah, 4 buah (dihubungkan seri).
3. Tidak membahas terkait State of Charge (SoC) dan karakteristik baterai.
4. Tidak membahas penentuan parameter PI.

5. Untuk mengkondisikan kecepatan putar motor saat pengujian, dan untuk mempermudah pengambilan data, maka pengujian dilakukan dengan model sederhana, dimana motor BLDC dikopel dengan motor DC *shunt* menggunakan rantai. Hal ini dilakukan untuk merepresentasikan keadaan sebenarnya.
6. Perhitungan energi kinetik saat pengujian regenerasi energi hanya menggunakan inersia dari mesin dan roda saja.
7. Konverter yang digunakan adalah bidirectional VSI.
8. Hanya membahas metode komutasi *six-step*.
9. Arus pengereman yang dibahas hanya sampai 5 A, dikarenakan keterbatasan kemampuan komponen secara aplikasi.

1.4 Tujuan

Tujuan yang diharapkan dalam penelitian ini adalah merencanakan dan merealisasikan *Regeneratif Braking System* pada motor BLDC menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari perancangan sistem pengereman listrik ini adalah:

1. Menyempurnakan kekurangan yang ada pada metode pengereman listrik yang sudah ada sebelumnya.
2. Memberikan rujukan tentang metode pengereman listrik untuk menunjang pengembangan teknologi selanjutnya.

1.6 Sistematika penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Membahas teori-teori yang mendukung dalam perencanaan dan pembuatan alat.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang metode-metode yang dipakai dalam melakukan perancangan, pengujian, dan analisis data.

BAB IV : PERANCANGAN DAN PEMBANGUNAN ALAT

Perancangan dan perealisasi alat yang meliputi spesifikasi, perencanaan diagram blok, prinsip kerja, simulasi dan realisasi alat.

BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Memuat aspek pengujian meliputi penjelasan tentang cara pengujian dan hasil pengujian. Aspek analisis meliputi penilaian atau komentar terhadap hasil-hasil pengujian.

BAB VI : KESIMPULAN DAN SARAN

Memuat intisari hasil pengujian dan menjawab rumusan masalah serta memberikan rekomendasi untuk perbaikan kualitas penelitian dimasa yang akan datang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

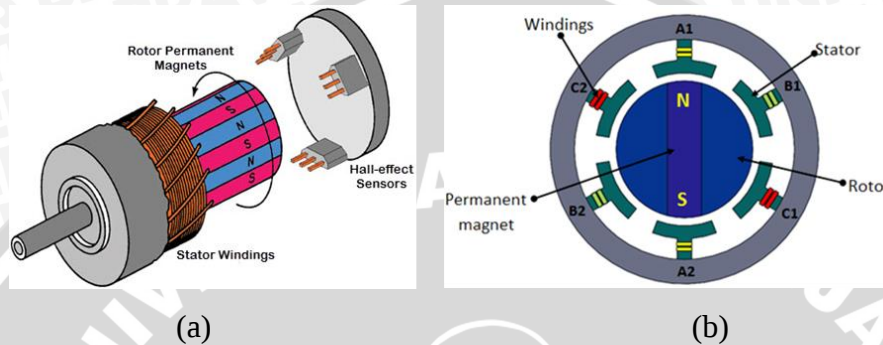
Piranti yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik umumnya disebut sistem penggerak elektrik. Sistem penggerak elektrik yang digunakan pada *Electric Vehicle* (EVs) adalah motor. Terdapat berbagai jenis motor yang biasa digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik, antara lain: motor DC magnet permanen, Motor DC penguat terpisah (dengan medan magnet yang dapat diatur), dan *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM). Di pasaran PMSM biasa dikenal dengan nama BLDC motor. Saat ini BLDC motor telah digunakan secara luas pada aplikasi EV karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, dan motor induksi. Keunggulan yang dimiliki BLDC motor seperti karakteristik torsi terhadap kecepatan yang lebih baik, range pengaturan kecepatan yang lebar, respon dinamik tinggi, torsi starting yang tinggi, efisiensi dan kehandalan tinggi, masa operasi lama (tidak ada erosi sikat), operasi tak bersuara, pengurangan interferensi elektromagnetik (EMI), rasio torsi terhadap ukuran motor tinggi, sehingga bermanfaat dalam aplikasi di mana ruang dan berat merupakan faktor penting, terutama aplikasi ruang angkasa (Hamdi, I.T.,2015). Karena pertimbangan di atas, maka BLDC motor dipilih sebagai Penggerak EV pada penelitian ini.

Pada motor sinkron, perubahan beban maupun kecepatan secara mendadak dapat menyebabkan sudut torsi (δ) naik melampaui 90° , sehingga menyebabkan motor akan lepas sinkron (*lose synchronism*). *Brushless DC (BLDC) Motor* sebenarnya adalah motor sinkron AC 3 fasa dengan magnet permanen terletak pada rotor. Namun pada BLDC digunakan mode pengendalian sendiri (*self-controlled*) memanfaatkan sensor posisi rotor dan sebuah inverter untuk mengendalikan arus pada belitan stator. Mode *self-controlled* pada BLDC memanfaatkan sensor posisi rotor yang di umpan balikkan pada kontroler untuk menentukan *timing* pensaklaran inverter. Dengan demikian perubahan frekuensi medan putar dapat diatur menyesuaikan kecepatan rotor saat itu. Hasilnya kecepatan rotor dapat dikendalikan tanpa harus mengalami kondisi lepas sinkron.

Walaupun merupakan synchronous AC 3 fasa, motor ini tetap disebut BLDC karena pada implementasinya BLDC Motor menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC oleh inverter 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC Motor adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Medan magnet putar yang dihasilkan stator dan *Back-EMF* yang dihasilkan oleh putaran rotor memiliki frekuensi yang sama.

2.1.1 Konstruksi *Brushless* DC (BLDC) Motor

Konstruksi motor BLDC berkebalikan dengan motor DC konvensional, karena bagian jangkar ada pada stator dan bagian medan (magnet permanen) ada pada rotor. Namun demikian, karakteristik operasi BLDC motor mirip dengan motor DC konvensional. Sensor posisi dan saklar semikonduktor pada inverter menggantikan peran sikat dan komutator mekanik yang ada pada motor DC konvensional.

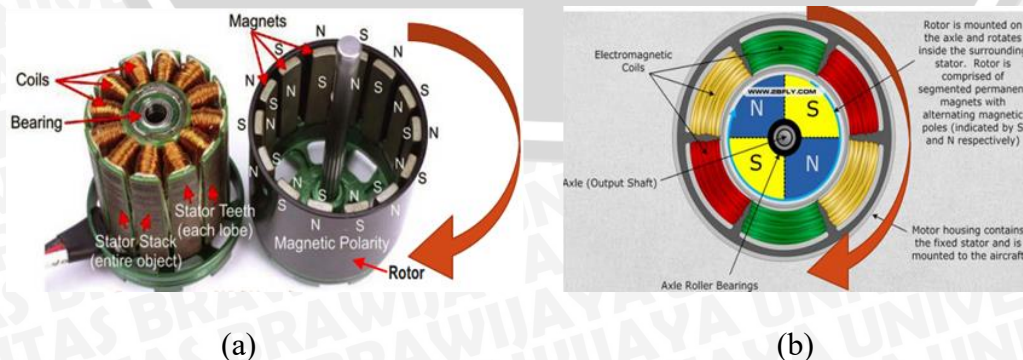


Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC.

Sumber: Application note Magnetic Position Sensing in BLDC (2012:1).

Stator motor BLDC memiliki konstruksi yang sama dengan motor sinkron ataupun motor Induksi (Xia, C.L., 2012). Kumparan stator dapat dihubungkan secara *Wye* ataupun *Delta*. Bagian rotor dari motor BLDC dibuat dari magnet permanen. Jumlah kutub dapat bervariasi tergantung dari kebutuhan. Penggunaan jenis bahan dari rotor akan berpengaruh pada torsi. Jika kerapatan fluksi bahan semakin besar, maka torsi motor juga akan semakin besar.

Timing komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah *Hall sensors* seperti terlihat pada gambar 2.1. Tiga buah *Hall sensors* diletakkan sedemikian rupa sehingga akan membentuk sinyal *feedback* dengan beda fasa 120° elektrik antar sensor. Melalui cara ini akan didapatkan 6 variasi posisi rotor yang berbeda.



Gambar 2.2 Bentuk rotor dan stator motor BLDC (a) *outrunner* (b) *inrunner*.

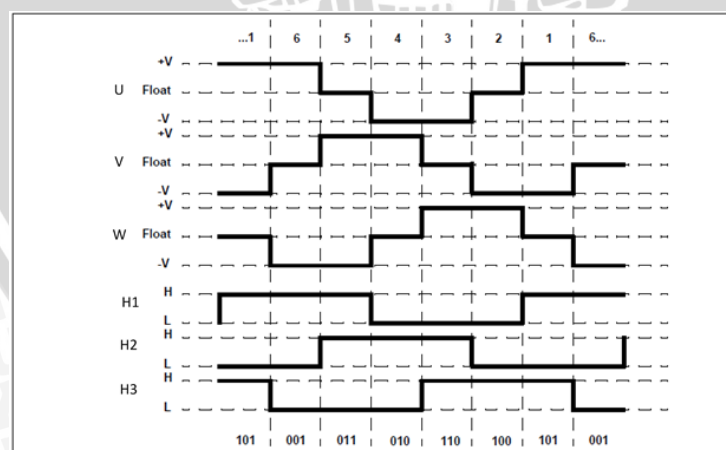
Sumber: Wahl (2014:5-6).

Motor BLDC secara umum terdiri dari dua jenis konstruksi yaitu *in-runner* dan *out-runner*, seperti terlihat pada gambar 2.2. Pada konstruksi *in-runner*, rotor/magnet permanen terletak di sisi dalam sedangkan stator terletak di sisi bagian luar. Motor BLDC *in-runner* memiliki karakteristik kecepatan yang tinggi, torsi rendah, efisiensi lebih tinggi dari *out-runner*, lebih rentan rusak, dan menimbulkan suara bising. Sedangkan untuk konstruksi *out-runner*, bagian rotor/magnet permanen terletak di sisi luar dan stator terletak di bagian dalam. Motor BLDC *out-runner* memiliki karakteristik kecepatan yang rendah, torsi tinggi, mudah digunakan, dan motor lebih tenang.

2.1.2 Metode *six-step* PWM dan Prinsip kerja motor BLDC.

Terdapat dua metode pengendalian BLDC secara umum yakni metode *six-step* PWM dan metode Sinusoidal PWM (SPWM). Metode *six-step* PWM merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC. Hal ini disebabkan karena metode ini lebih sederhana dan mudah diterapkan dibandingkan metode SPWM.

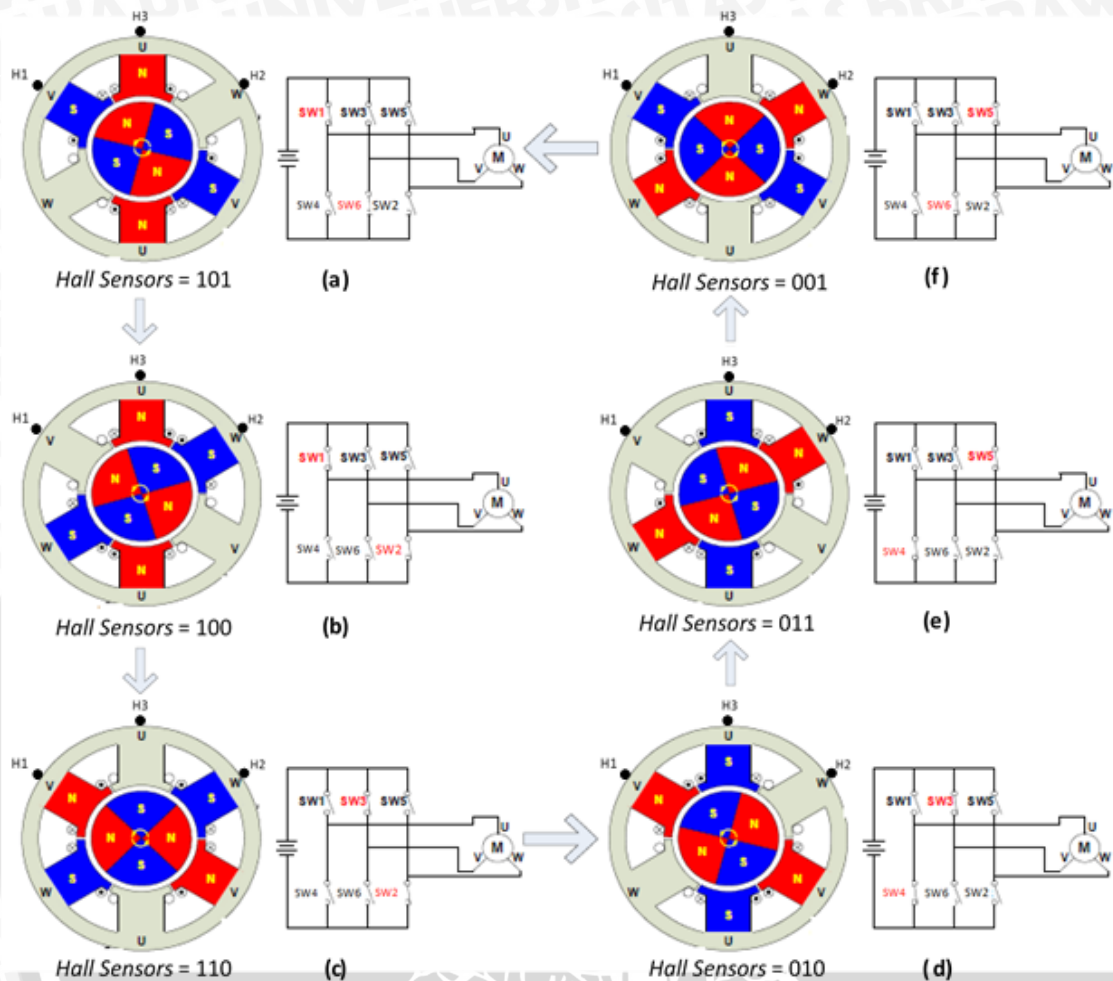
Metode ini disebut *six-step* PWM karena mampu menciptakan gelombang *square* menyerupai gelombang sinusoida. Gelombang yang dihasilkan adalah gelombang tiga fasa *square* yang setiap fasanya terdiri dari 6 bagian yakni 2 bagian positif, 2 bagian negatif, dan 2 bagian *floating* (tidak bertegangan). Masing-masing bagian besarnya 60° elektrik (1 siklus elektrik = 360° elektrik). Bentuk gelombang tiga fasa *square* ditunjukkan oleh gambar 2.3. Penerapan PWM bertujuan untuk mengatur besar nilai rms tegangan terminal dan arus jangkar, dengan demikian kecepatan motor dapat dikontrol dengan mengatur *duty cycle* PWM.



Gambar 2.3 Sinyal *Hall sensors* dan teganan 3 fasa *square*.
Sumber: Brown (2002: 2).

Gambar 2.3 menunjukkan kombinasi *Hall sensors*, serta polaritas terminal belitan U, V, dan W yang terhubung pada inverter. Terlihat pada kondisi *Hall sensors* 101, ujung

belitan U akan mendapat polaritas positif, ujung belitan V mendapat polaritas negatif, dan belitan W dalam keadaan *floating*/ tidak dicatu polaritas apapun (*open circuit*).



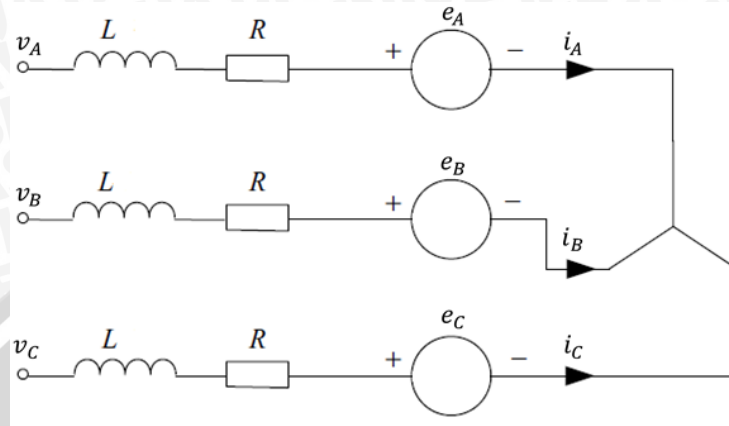
Gambar 2.4 Prinsip kerja motor BLDC.
Sumber: Zao (2011: 16).

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa motor BLDC dapat berputar karena adanya medan magnet putar dari stator. Berikut ini akan dijelaskan secara sederhana bagaimana motor BLDC dapat berputar dengan pensaklaran inverter berdasarkan metode *six-step*.

Gambar 2.4 menunjukkan konstruksi bagian stator dan rotor motor BLDC secara sederhana, *timing* pensaklaran inverter, serta kombinasi *Hall sensors*. Ketika *Hall sensors* membentuk kombinasi 101 (pada gambar 2.4a), maka ujung belitan fasa U akan dicatu oleh tegangan positif, sehingga akan membentuk kutub utara, sebaliknya ujung belitan fasa V akan mendapat polaritas negatif, sehingga terbentuk kutub selatan. Pada kondisi ini rotor akan cenderung berputar berlawanan arah jarum jam (*Counter Clock Wise*), akibat kutub-kutub yang berlawanan akan tarik-menarik, sedangkan kutub yang sejenis akan tolak-menolak. Proses yang serupa akan terjadi pada kelima kondisi lainnya (gambar 2.4b s/d

2.4f). Terlihat untuk keenam kondisi akan berulang lagi pada kondisi pada gambar 2.4a, dan dengan urutan pensaklaran inverter seperti pada gambar 2.4, rotor akan berputar berlawanan arah dengan jarum jam.

2.1.3 Model motor BLDC



Gambar 2.5 Pemodelan skematik rangkain motor BLDC.

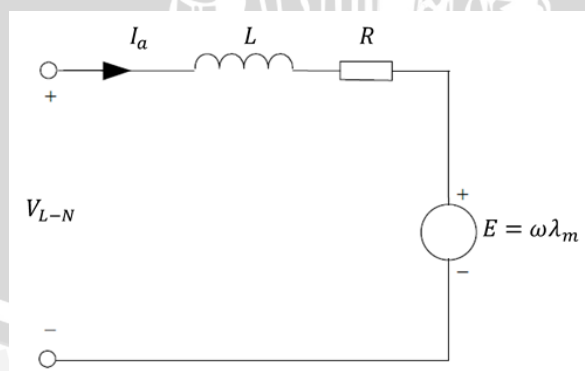
Sumber: Xia (2012:38).

Gambar 2.5 menunjukkan rangkaian ekivalen inverter dan motor BLDC. Dengan menganggap setiap fasa memiliki impedansi yang seimbang, maka persamaan tegangan dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

dimana L adalah induktansi motor, R adalah resistansi jangkar.

Rangkaian ekivalen per fasa dari motor BLDC ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen satu fasa motor BLDC

Sumber: Xia (2012:41).

Persamaan *steady state* didapatkan:

$$V_{L-N} = E + (R_a + jX_s)I_a \quad (2-2)$$

karena

$$E = \omega_e \lambda_m \quad (2-3)$$

maka persamaan arus jangkar dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_a = \frac{V_{L-N} - \omega_e \lambda_m}{R + jX_s} \quad (2-4)$$

dengan:

V_{L-N} = Tegangan line to netral (V).

E = Back EMF (V).

I_a = Arus pada belitan jangkar (A).

R_a = Resistansi jangkar (ohm).

X_s = Reaktansi jangkar (ohm).

λ_m = Flux linkage (fluksi terkurung) dari belitan stator per fasa, karena magnet permanen.

ω_e = kecepatan angular gelombang elektrik (rad/s).

Motor BLDC memiliki umpan balik posisi dari rotor melalui sensor efek medan, perangkat optik, encoder dan sebagainya untuk menjaga sudut tertentu antara V dan E, karena E sefasa dengan posisi rotor, dan V ditentukan oleh sumber inverter ke motor. Dengan menganggap E dan I sefasa, maka keluaran daya mekanik motor (sebelum gesekan, belitan, dan rugi besi) disebut daya keluaran elektromagnetik dengan persamaan:

$$P_{em} = m |E| |I_a| \cos \varphi = m \omega_e |\lambda_m| |I_a| ; \text{ dengan } \cos \varphi = 1 \quad (2-5)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2-4 ke 2-5, maka diperoleh:

$$P_{em} = m \omega_e \lambda_m \left(\frac{V_{L-N} - \omega_e \lambda_m}{R + jX_s} \right)$$

$$P_{em} = \frac{m \lambda_m}{R + jX_s} (V_{L-N} \omega_e - \omega_e^2 \lambda_m)$$

karena $\omega_e = \frac{p}{2} \omega_r = \frac{p}{2} 2\pi \left(\frac{n_r}{60} \right)$, maka

$$P_{em} = \frac{p m \lambda_m}{2(R + jX_s)} \left(\frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} \omega_r - \frac{p}{2} \lambda_m \omega_r^2 \right)$$

$$P_{em} = \frac{2\pi^2 p m \lambda_m}{3600(R + jX_s)} \left(\frac{60 V_{L-L}}{2\pi\sqrt{3}} n_r - \frac{p}{2} \lambda_m n_r^2 \right) \quad (2-6)$$

dengan:

P_{em} = Daya elektromagnetik (watt)

m = jumlah fasa ($m=3$).

ω_r = kecepatan sudut rotor (rad/s)

n_r = kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub.

Persamaan 2-6 merupakan persamaan daya terhadap fungsi kecepatan rotor (dalam rpm). Apabila V_{L-L} tetap, maka akan didapatkan hubungan daya elektromagnetik terhadap kecepatan putar rotor yang berbentuk parabola terbalik, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7. Dan persamaan torsi elektromagnetik dapat diturunkan dengan membagi persamaan 2-5 dengan kecepatan sudut rotor.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{m \omega |\lambda_m| |I_a|}{\omega_r} \quad (2-7)$$

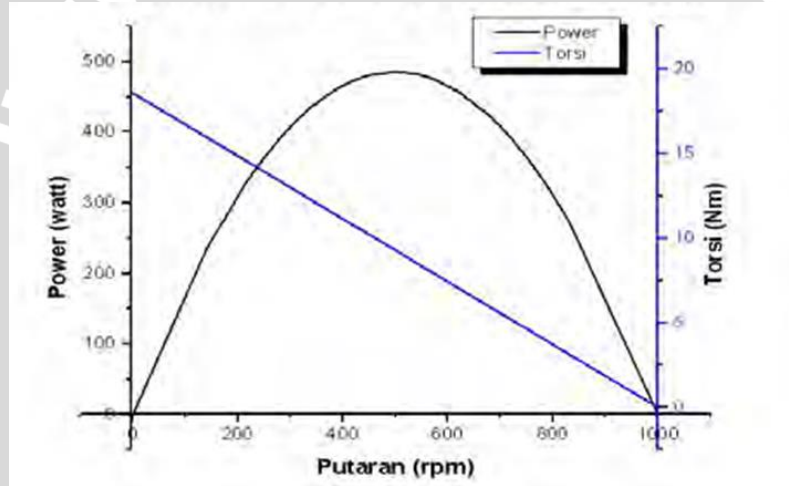
karena $\omega_e = \frac{p}{2} \omega_r$, maka

$$T_{em} = \frac{mp}{2} |\lambda_m| |I_a| \quad (2-8)$$

Torsi keluaran actual shaft adalah

$$T_{load} = T_{em} - T_{losses} \quad (2-9)$$

dimana torsi rugi meliputi gesekan, belitan, dan rugi besi.



Gambar 2.7 Kurva karakteristik Daya, Torsi vs Putaran
Sumber: Wengi (2014:2).

Selain persamaan torsi dan daya terhadap kecepatan, persamaan lainnya adalah persamaan yang menghubungkan antara tegangan terminal terhadap torsi (2-10), dan kecepatan rotor terhadap torsi (2-11).

$$V_{L-N} = \frac{p}{2} \omega_r \lambda_m + \frac{2(R+jX_s)}{mp\lambda_m} T_{em} \quad (2-10)$$

$$\omega_r = \frac{V}{p\lambda_m/2} - \frac{(R+jX_s)}{m(\frac{p\lambda_m}{2})^2} T_{em} \quad (2-11)$$

Rugi-rugi motor BLDC terdiri dari rugi tembaga w_c , rugi besi w_i dan rugi mekanik w_m . Persamaan rugi tembaga dan rugi besi ditunjukkan dalam persamaan 2-12 dan 2-13.

$$P_c = 3I_a^2 R_a \quad (2-12)$$

$$P_i = K_e f^2 B_m^2 + K_h f B_m^2 \quad (2-13)$$

dengan:

I_a = arus fasa,

R_a = resistansi jangkar,

K_e = koefisien rugi arus-edy,

K_h = koefisien rugi histerisis,

f = frekuensi,

B_m = kerapatan fluks maksimum.

K_e dan K_h didapat dari kurva rugi laminasi besi.

Efisiensi motor didapat dengan perbandingan daya keluaran dan daya masukan

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-14)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + w_c + w_i} \quad (2-15)$$

Dimana $P_{in} = VI$, dan $P_{out} = T_{load}\omega_r$.

Motor BLDC terdiri dari beberapa parameter yaitu:

1. Koefisien tegangan motor K_e (Volt-sec/rad)

Pengukuran dilakukan dengan memutar motor pada kecepatan (rpm) tertentu, lalu voltmeter digunakan untuk mengukur tegangan *line to line* (V). K_e didapatkan dengan persamaan:

$$K_e = \frac{V_{emf,L-L}}{n_r} \quad (2-16)$$

sedangkan koefisien elektrik untuk *Back EMF* per fasa adalah:

$$K_e(\text{per phase}) = \frac{K_e}{\sqrt{3}} \quad (2-17)$$

2. Konstanta torsi motor K_T (Nm/A)

K_T merupakan koefisien yang menyatakan gradien kenaikan torsi elektromagnetik motor terhadap arus jangkar. K_T dapat ditentukan berdasarkan K_e .

$$T_{em} = \frac{\sqrt{3}V_{emf,L-L} \cdot I_a}{\omega_r} = \frac{\sqrt{3}K_e n_r \cdot I_a}{2\pi \frac{n_r}{60}} \quad (2-18)$$

$$T_{em} = 16,54K_e \times I_a = K_T \times I_a$$

dengan demikian persamaan K_T dan K_e dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K_T = 16,54K_e \quad (2-19)$$

3. Tahanan motor R_a (Ω)

Nilai resistansi jangkar (R_a) dapat diukur dengan menghubungkan *probe* ohmmeter pada terminal motor BLDC.

Jika hubungan belitan motor Y (wye), maka

$$R_{a(per\ fasa)} = \frac{\text{nilai penunjukan ohmmeter}}{2} \quad (2-20)$$

Jika hubungan belitan motor Y (wye), maka

$$R_{a(per\ fasa)} = \frac{2}{3} \times \text{nilai penunjukan ohmmeter} \quad (2-21)$$

4. Induktansi motor L (H)

Pengujian untuk menentukan induktansi motor dilakukan dengan cara memutar motor BLDC pada beberapa variasi putaran (dioperasikan sebagai generator), kemudian mencatat arus fasa motor yang mengalir melalui hambatan 1 ohm seimbang hubungan Y (wye). Melalui persamaan-persamaan berikut dapat dihitung besar induktansi motor.

$$V_{emf,L-L} = 0,05 \cdot n_r \quad (2-22)$$

$$Z = \frac{V_{emf,L-L}}{\sqrt{3}I_a} \quad (2-23)$$

$$X_s = \sqrt{Z^2 - (1 + R_a)^2} \quad (2-24)$$

$$L = \frac{X_s}{2\pi f_e} \quad (2-25)$$

Dengan Z, X_s , L adalah impedansi total sistem, dan reaktansi jangkar, induktansi motor.

5. Inersia motor $J_m \left(\frac{Nm \cdot sec^2}{rad} \right)$

Inersia motor untuk motor BLDC *outrunner* dengan velg dan ban dapat dihitung dengan persamaan 2-24.

$$I = \frac{1}{2} m_{velg} \cdot r_{velg}^2 + m_{ban} \cdot r_{ban}^2 \left(\frac{Nm \cdot sec^2}{rad} \right) \quad (2-26)$$

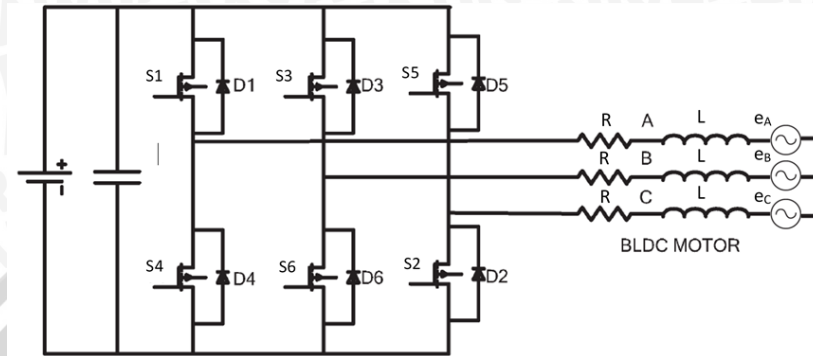
dengan m_{velg} , r_{velg} adalah masa dan jari-jari velg, sedangkan m_{ban} , r_{ban} adalah masa dan jari-jari ban.

2.2 Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI)

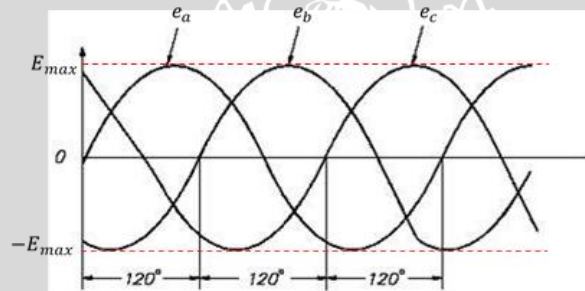
Bidirectional Voltage Source Inverter merupakan Inverter sumber tegangan yang dapat bekerja dua arah, yaitu yaitu mengalirkan daya dari baterai ke motor saat mode akselerasi, dan mengalirkan daya motor ke baterai pada proses pengereman regeneratif. Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian ekivalen motor BLDC dan VSI sebagai penggerak. Catu daya utamanya berupa baterai. R dan L merupakan resistansi dan induktansi jangkar motor BLDC. e_A, e_B, e_C , merupakan GGL-lawan BLDC. S1-S6 merupakan saklar penyalan inverter, dan D1-D6 adalah dioda *freewheeling*. Antara baterai dan inverter terdapat *dc-link capacitor* sebagai media penyimpanan energi sementara.

Pengoperasian motor BLDC pada sistem ini menggunakan metode *six-step*. Pada

metode ini akan terbagi menjadi 6 buah kondisi komutasi dalam 360° elektrik. Mode *six-step* yang digunakan adalah “ 120° conduction mode”, yang artinya setiap saklar akan konduksi sebesar 120° elektrik dalam 1 siklus elektrik (360° elektrik). Karena keenam kondisi komutasi memiliki prinsip yang sama, maka dalam penjelasan akan dibahas kondisi I saja (state I).



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen VSI sebagai driver motor BLDC.
Sumber: Nian (2014:5799).



Gambar 2.9 Gelombang *Back EMF* tegangan AC 3 fasa.

Persamaan matematis untuk gambar 2.9 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$e_A = E_{max} \sin(\omega t) ; e_B = E_{max} \sin(\omega t - 120^\circ) ; e_C = E_{max} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Apabila gelombang tersebut dilewatkan pada *freewheeling* dioda, maka akan terbentuk gelombang tegangan DC seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. indeks e_{AB} , e_{AC} , e_{BC} , e_{BA} , e_{CA} , e_{CB} merupakan *Back EMF* yang membentuk gelombang DC tersebut. Apabila v_s merupakan fungsi sesaat dari gelombang DC, maka v_s akan memiliki periode sebesar $1/6$ dari periode gelombang *Back EMF*. Jika dinyatakan dalam sudut fasa elektrik, maka v_s dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$v_s = e_A - e_B = e_{AB}$$

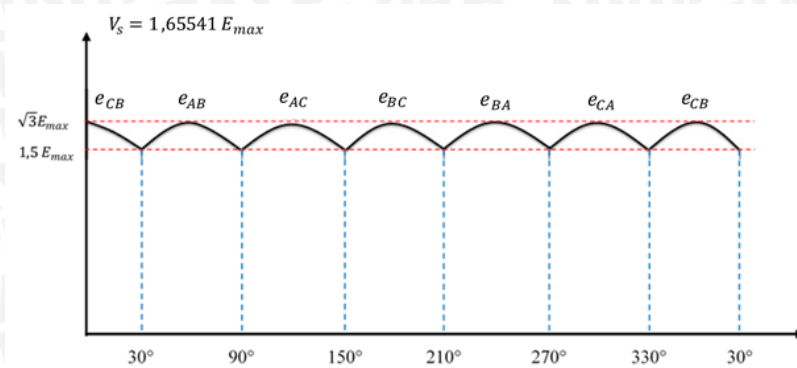
$$v_s = E_{max} [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 120^\circ)] \text{ untuk } 30^\circ \leq \omega t \leq 90^\circ \quad (2-27)$$

dengan:

v_s = Tegangan sesaat antara fasa yang aktif (bukan saat *floating*).

e_A, e_B, e_C = nilai sesaat *Back EMF*.

E_{max} = nilai *Back EMF* maksimum.

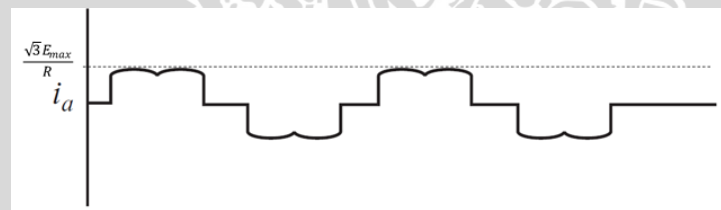


Gambar 2.10 Gelombang 3 fasa setelah disearahkan oleh *freewheeling* dioda.

Pada gambar 2.10 terlihat bahwa v_s akan memiliki nilai terendah sebesar $1,5E_{max}$ dan tertinggi adalah $\sqrt{3}E_{max}$. Nilai efektif (rms) dari v_s dapat dihitung dengan mengetahui $V_{emf,L-L}$. Persamaan 2-28 menunjukkan hubungan V_s dan $V_{emf,L-L}$.

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/6} (\sqrt{3}E_{max})^2 \cos^2(\omega t) d(\omega t)} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot E_{max}$$

$$V_s = 1,6554 \cdot E_{max} = 1,35163 V_{emf,L-L} \quad (2-28)$$



Gambar 2.11 Gelombang arus pada belitan jangkar motor.

Gambar 2.11 menunjukkan arus pada belitan jangkar motor. Terlihat bahwa arus puncak pada belitan motor adalah $\sqrt{3}E_{max}/R$, dan untuk lembah adalah $-\sqrt{3}E_{max}/R$, sehingga nilai efektif (rms) arus jangkar dapat diturunkan sebagai pada persamaan di bawah ini. Persamaan 2-29 menyatakan hubungan arus jangkar (rms) terhadap nilai puncak arus jangkar.

$$I_a = \sqrt{\frac{8}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos^2(\omega t) d(\omega t)} = I_m \left[\frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right) \right]^{1/2}$$

$$I_a = 0,7804 \cdot I_m \quad (2-29)$$

Keterangan:

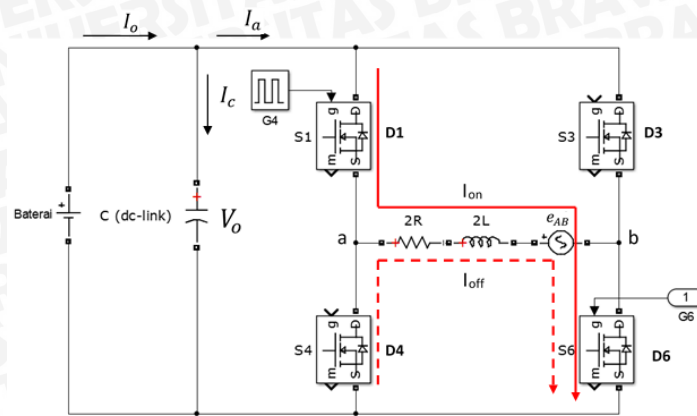
I_a = arus jangkar efektif (rms).

I_m = Arus jangkar maksimum.

V_s = Nilai efektif tegangan DC low.

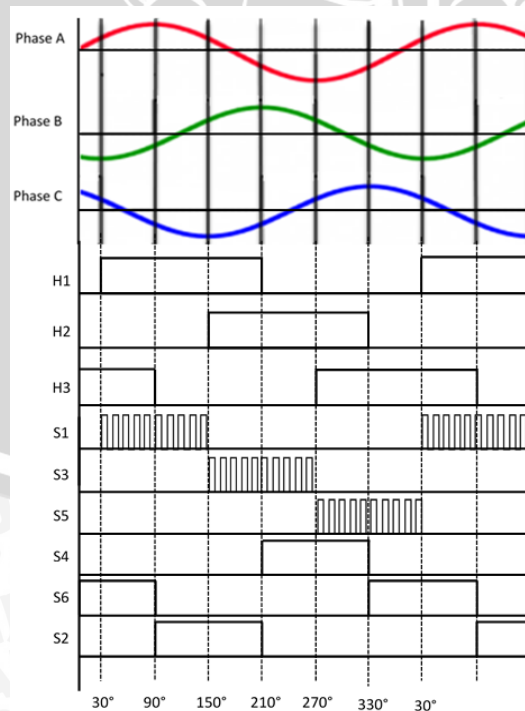
R = Resistansi Beban.

2.2.1 VSI dalam mode akselerasi



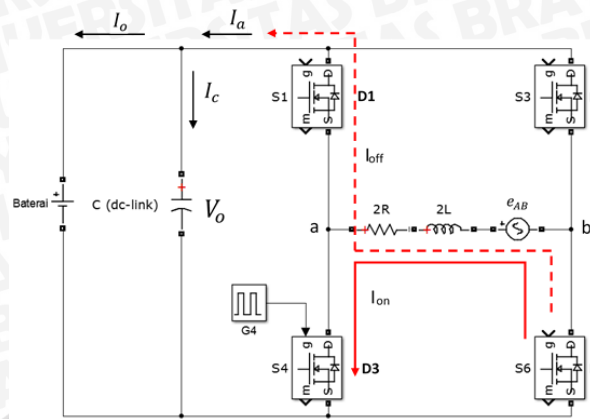
Gambar 2.12 Aliran arus saat mode akselerasi.

Ketika motor dioperasikan dalam mode akselerasi, maka kelompok saklar bernomor ganjil (*High side*) akan dioperasikan dengan mode PWM dengan urutan sesuai kombinasi *Hall sensor* pada gambar 2.13, sedangkan saklar bernomor genap (*Low-side*) akan terus menyala dengan urutan sesuai kombinasi kombinasi *Hall sensors* pada gambar 2.13. Pada gambar 2.12 terlihat bahwa ketika S1 dan S6 konduksi maka arus I_{on} akan mengalir dari titik a ke b mengisi induktor. Ketika S1 padam maka induktor mengalami *discharge* sehingga I_{off} akan mengalir melalui S6 dan D4 membentuk rangkaian tertutup. e_{AB} adalah *Back-EMF* motor. *Back EMF* muncul karena induksi dari rotor. Arus efektif pada belitan motor dapat diatur dengan mengatur *duty cycle* PWM dari kelompok saklar bernomor ganjil.



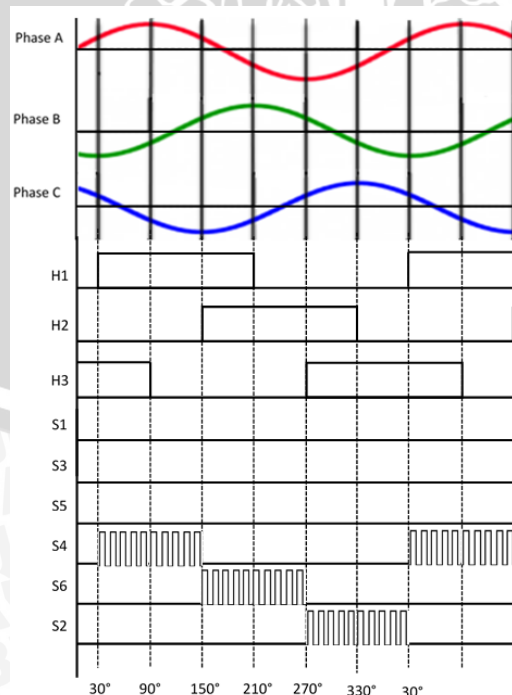
Gambar 2.13 Ilustrasi *Back-EMF*, *Hall Sensors*, dan sinyal picu pada mode akselerasi.

2.2.2 VSI dalam mode regeneratif



Gambar 2.14 Aliran arus saat mode regeneratif.

Pengereman regeneratif adalah jenis pengereman elektrik dimana energi mekanik dari putaran motor akan dikonversi menjadi energi elektrik dan dikembalikan ke catu daya seiring perlambatan. Mode ini dilakukan dengan cara mengoperasikan kelompok saklar bernomor genap dalam mode PWM dengan urutan sesuai dengan kombinasi *Hall sensors* pada gambar 2.15. Pada gambar 2.14 terlihat bahwa ketika S4 konduksi, maka e_{ab} , $2R$, dan $2L$ akan membentuk rangkaian tertutup. Arus mengalir dari node b ke a (berlawanan arah dengan mode akselerasi). Pada kondisi ini akan mengalir arus I_{on} yang mengisi induktor. Ketika S4 padam, induktor akan mengalami *discharge* sehingga I_{off} akan mengalir melalui *freewheeling diode* menuju baterai dan terjadi regenerasi energi. Prinsip kerja kondisi ini menyerupai prinsip kerja rangkaian *Boost converter*.



Gambar 2.15 Ilustrasi *Back-EMF*, *Hall Sensors*, dan sinyal picu pada mode akselerasi.

Karena tegangan rata-rata induktor dalam satu periode adalah nol, maka dapat diturunkan persamaan arus jangkar yang mengalir sebagai berikut.

$$\int_{t_0}^{t_0+T} v_L(t) dt = T \cdot v_L = 0$$

$$DT[v_s - i_a(2R)] + D'T[v_s - V_o - i_a(2R)] = 0$$

$$i_a = \frac{v_s - V_o(1-D)}{2R} \quad (2-30)$$

Karena rata-rata arus yang mengalir pada kapasitor adalah nol untuk satu periode, maka dapat diturunkan hubungan antara arus yang mengalir pada baterai dan arus jangkar.

$$\int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt = DT(-i_o) + D'T(i_a - i_o) = 0$$

$$i_a(1-D) = i_o \quad (2-31)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2-31 ke 2-30 maka didapatkan:

$$i_a = \frac{v_s - i_o \cdot R_b(1-D)}{2R}$$

$$i_a = \frac{v_s}{R_b(1-D)^2 + 2R} \quad (2-32)$$

Nilai puncak *Back*-EMF dan arus I_a dinyatakan sebagai berikut. Dimana 0,7804 adalah koefisien nilai efektif arus jangkar yang telah diturunkan pada persamaan 2-29.

$$V_{s\max} = \sqrt{3}E_{\max} = \sqrt{2}V_{emf,L-L} \quad (2-33)$$

$$I_a = 0,7804 \times I_{a,\max} \quad (2-34)$$

sehingga $I_{a,rms}$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_a = 0,7804 \times \frac{\sqrt{2}V_{emf,L-L}}{R_b(1-D)^2 + 2R} \quad (2-35)$$

Persamaan 2-35 dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} = R_b(1-D)^2 I_a + (2R)I_a$$

Berdasarkan persamaan 2-32, maka dapat diturunkan hubungan arus efektif I_a dan I_o , dengan $\sqrt{3/2}$ merupakan koefisien arus efektif DC terhadap arus AC.

$$\sqrt{\frac{3}{2}} I_a(1-D) = I_o$$

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_o}{(1-D)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1-D)}$$

$$0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} = R_b(1-D)^2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1-D)} + (2R) \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1-D)}$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{3}{2}} 0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} &= (1-D)V_o + (2R) \frac{V_o}{R_b(1-D)} \\ 1,35163V_{emf,L-L} &= (1-D)V_o \left(1 + (2R) \frac{1}{R_b(1-D)^2} \right) \\ V_o &= \left(\frac{1,35163V_{emf,L-L}}{(1-D)} \right) \left(\frac{1}{1+2R/[R_b(1-D)^2]} \right) \end{aligned} \quad (2-36)$$

dengan:

I_o = Arus pada sisi baterai.

R_b = Resistansi pengganti baterai.

V_o = Tegangan terminal baterai.

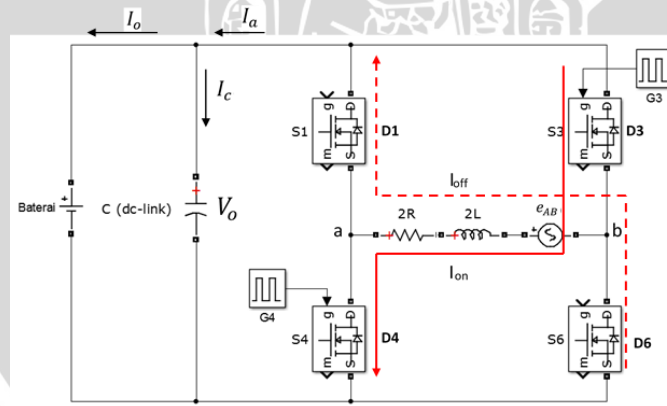
$V_{emf,L-L}$ = Back-EMF line to line.

D = Duty cycle

R = Resistansi jangkar.

R_b = Resistansi pengganti untuk baterai.

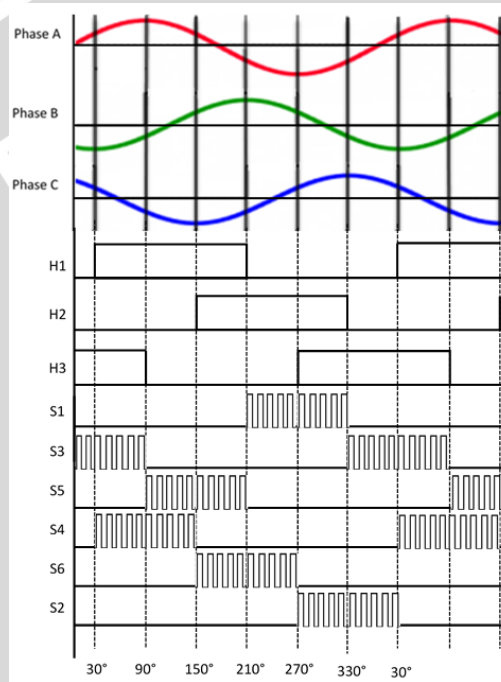
2.2.3 VSI dalam mode Regeneratif-plugging



Gambar 2.16 Aliran arus saat mode Regeneratif-plugging.

Pada kecepatan rendah pengereman mode pengereman regeneratif sudah tidak lagi efektif. Hal ini disebabkan *Back-EMF* dari BLDC relatif kecil dan untuk menaikkan level tegangan dibutuhkan *duty cycle* yang tinggi. *Duty cycle* yang tinggi (diatas 90%) menyebabkan kenaikan tegangan VSI sebagai *Boost converter* menjadi tidak stabil. Untuk mewujudkan arus pengereman yang diinginkan, terutama jika arus pengereman yang diinginkan relatif tinggi, diperlukan metode pengereman *plugging* disamping regeneratif.

Mode ini menggunakan kombinasi pengereman plugging dan regeneratif untuk melakukan perlambatan. Mode ini dilakukan dengan cara mengoperasikan kelompok saklar bernomor genap dan ganjil dalam mode PWM sesuai urutan pada gambar 2.17. Pada gambar 2.16 terlihat bahwa ketika S3 dan S4 konduksi, maka I_{on} akan mengalir dari baterai melewati belitan motor dari node b ke a (berlawanan dengan arah arus pada mode akselerasi). Pada kondisi ini I_{on} akan mengisi induktor. Ketika S3 dan S4 padam, maka induktor akan mengalami *discharge*. Arus I_{off} akan mengalir menuju baterai melalui *freewheeling diode* D1 dan D6 seperti pada gambar. Persamaan arus jangkar dapat dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 2.17 Ilustrasi *Back-EMF*, *Hall Sensors*, dan sinyal picu pada mode akselerasi.

Persamaan arus jangkar terhadap *duty cycle* dapat ditentukan berdasarkan persamaan tegangan induktor, rata-rata tegangan induktor ideal untuk satu periode adalah nol.

$$\int_{t_0}^{t_0+T} v_L(t) dt = T \cdot v_L = 0$$

$$DT[V_s + V_o - i_a(2R)] + D'T[V_s - V_o - i_a(2R)] = 0$$

$$i_a = \frac{v_s - V_o(1-2D)}{2R} \quad (2-37)$$

dari persamaan keseimbangan muatan kapasitor, maka didapatkan persamaan penyetaraan arus i_a dan i_o .

$$\int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt = DT(-i_a - i_o) + D'T(i_a - i_o) = 0$$

$$i_a(1 - 2D) = i_o \quad (2-38)$$

dengan mensubstitusikan persamaan 2-38 ke 2-37 maka didapatkan :

$$i_a = \frac{v_s - i_o \cdot R_b(1 - 2D)}{2R}$$

$$i_a = \frac{v_s}{R_b(1-2D)^2 + 2R} \quad (2-39)$$

Nilai puncak *Back*-EMF dan arus $I_{a,rms}$ dinyatakan sebagai berikut. Dimana nilai 0,7804 konstanta nilai rms arus jangkar yang telah diturunkan pada persamaan 2-29.

$$V_{s\ max} = \sqrt{3}E_{max} = \sqrt{2}V_{emf,L-L} \quad (2-40)$$

$$I_a = 0,7804 \times I_{a,max} \quad (2-41)$$

sehingga $I_{a,rms}$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_a = 0,7804 \times \frac{\sqrt{2}V_{emf,L-L}}{R_b(1-2D)^2 + 2R} \quad (2-42)$$

Persamaan 2-42 dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} = R_b(1 - 2D)^2 I_a + (2R)I_a$$

Berdasarkan persamaan 2-32, maka dapat diturunkan hubungan arus efektif I_a dan I_o , dengan $\sqrt{3/2}$ merupakan koefisien arus efektif DC terhadap arus AC.

$$\sqrt{\frac{3}{2}} I_a (1 - 2D) = I_o$$

$$I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_o}{(1 - 2D)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1 - 2D)}$$

$$0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} = R_b(1 - 2D)^2 \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1 - 2D)} + (2R) \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_o}{R_b(1 - 2D)}$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$\sqrt{\frac{3}{2}} 0,7804\sqrt{2}V_{emf,L-L} = (1 - 2D)V_o + (2R) \frac{V_o}{R_b(1 - 2D)}$$

$$1,35163V_{emf,L-L} = (1 - 2D)V_o \left(1 + (2R) \frac{1}{R_b(1 - 2D)^2} \right)$$

$$V_o = \left(\frac{1,35163V_{emf,L-L}}{(1-2D)} \right) \left(\frac{1}{1+2R/[R_b(1-2D)^2]} \right) \quad (2-43)$$

dengan:

I_o = Arus pada sisi baterai.

R_b = Resistansi pengganti baterai.

V_o = Tegangan terminal baterai.

$V_{emf,L-L}$ = Back EMF *line to line*.

D = *Duty cycle*

R = Resistansi jangkar.

R_b = Resistansi pengganti untuk baterai.

2.3 Perhitungan *Ripple* VSI

2.3.1 Mode Regeneratif

Tegangan induktor ketika saklar terbuka dan tertutup dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$2L \frac{di_a}{dt} = V_s - i_a(2R) \quad (\text{saat saklar tertutup}) \quad (2-44)$$

$$2L \frac{di_a}{dt} = V_s - V_o - i_a(2R) \quad (\text{saat saklar terbuka}) \quad (2-45)$$

dengan mengabaikan resistansi jangkar, dan menganggap konverter memiliki komponen yang ideal, maka persamaan di atas dapat diambil pendekatannya sebagai berikut:

$$\frac{(\Delta i_a)_{closed}}{DT} = \frac{V_s}{2L}$$

$$\frac{(\Delta i_a)_{open}}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{2L}$$

Dalam kondisi *steady-state* total perubahan arus induktor adalah sama dengan nol, sehingga arus rms nya tetap. Perubahan arus induktor dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$(\Delta i_a)_{closed} = \frac{V_s DT}{2L} = \frac{V_s D}{f \cdot (2L)} \quad (2-46)$$

$$(\Delta i_a)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{(2L)} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)}{f \cdot (2L)} \quad (2-47)$$

Frekuensi *switching* dapat dipertimbangkan melalui persamaan berikut:

$$f_{sw} = \frac{V_s D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (2-48)$$

seperti yang telah diturunkan pada persamaan 2-28, $V_s = 1,35163 V_{emf,L-L}$, maka:

$$f_{sw} = \frac{1,35163 V_{emf,L-L} D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (2-49)$$

Persamaan arus pada kapasitor dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_c = C \frac{dv_o}{dt}$$

Pada mode regeneratif, kapasitor akan membuang muatan ke beban ketika saklar tertutup.

Persamaan *ripple* tegangan dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\frac{V_o}{R_b} = C \frac{\Delta V_o}{DT}$$

Kapasitor kompensasi untuk *ripple* tegangan akibat *switching* dapat dihitung dengan

persamaan berikut ini.

$$C_{sw} = \frac{D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot R_b \cdot f_{sw}} = \frac{D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot f_{sw}} \quad (2-50)$$

dengan:

Δi_a = ripple arus.

ΔV_o = ripple tegangan.

f_{sw} = frekuensi *switching*.

C_{sw} = Kapasitor kompensasi *switching*.

2.3.2 Mode Regeneratif-plugging

Tegangan induktor ketika saklar terbuka dan tertutup dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$2L \frac{di_a}{dt} = V_s + V_o - i_a(2R) \quad (\text{saat saklar tertutup}) \quad (2-51)$$

$$2L \frac{di_a}{dt} = V_s - V_o - i_a(2R) \quad (\text{saat saklar terbuka}) \quad (2-52)$$

dengan mengabaikan resistansi jangkar, dan menganggap konverter memiliki komponen yang ideal, maka persamaan di atas dapat diambil pendekatannya sebagai berikut:

$$\frac{(\Delta i_a)_{closed}}{DT} = \frac{V_s + V_o}{2L}$$

$$\frac{(\Delta i_a)_{open}}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{2L}$$

Dalam kondisi *steady-state* total perubahan arus induktor adalah sama dengan nol, sehingga arus rms nya tetap. Perubahan arus induktor dapat dinyatakan sebagai berikut

$$(\Delta i_a)_{closed} = \frac{(V_s + V_o)DT}{(2L)} = \frac{(V_s + V_o)D}{f \cdot (2L)} \quad (2-53)$$

$$(\Delta i_a)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{2L} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)}{f \cdot (2L)} \quad (2-54)$$

Frekuensi *switching* dapat dipertimbangkan melalui persamaan berikut.

$$f_{sw} = \frac{(V_s + V_o)D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (2-55)$$

seperti yang telah diturunkan pada persamaan 2-28, $V_s = 1,35163 V_{emf,L-L} + V_o$, maka:

$$f_{sw} = \frac{(1,35163 V_{emf,L-L} + V_o)D}{\Delta i_a \cdot (2L)}$$

$$f_{sw} = \frac{1,35163 V_{emf,L-L} \left(1 + \frac{1}{1-2D}\right) D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (2-56)$$

Persamaan arus pada kapasitor dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_c = C \frac{dv_o}{dt}$$

Pada mode Regeneratif-*plugging*, kapasitor akan membuang muatan ke beban ketika saklar tertutup. Persamaan *ripple* tegangan dapat diturunkan sebagai berikut.

$$\frac{V_o}{R_b} + I_a = C \frac{\Delta V_o}{DT}$$

Kapasitor kompensasi untuk ripple tegangan akibat *switching* dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$C_{sw} = \frac{\left(\frac{V_o}{R_b} + \frac{V_o}{R_b(1-2D)}\right)DT}{\Delta V_o}$$

$$C_{sw} = \frac{\left(1 + \frac{1}{(1-2D)}\right)D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot R_b \cdot f_{sw}} = \frac{\left(1 + \frac{1}{(1-2D)}\right)D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot f_{sw}} \quad (2-57)$$

dengan:

Δi_a = ripple arus.

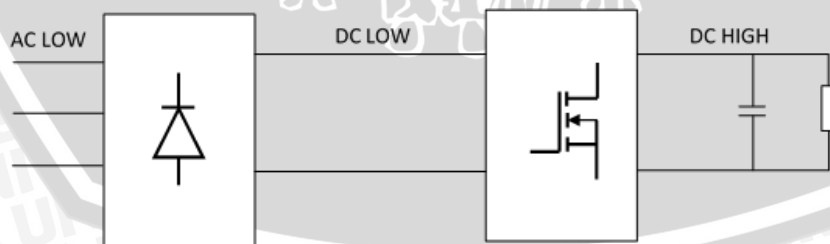
ΔV_o = ripple tegangan.

f_{sw} = frekuensi *switching*.

C_{sw} = Kapasitor kompensasi *switching*.

2.3.3 Ripple Freewheeling Diode

Gambar 2-18 menunjukkan proses kerja sistem secara terpisah. Sistem digambarkan secara terpisah untuk mempermudah dalam melakukan analisis. Pada dasarnya sistem terdiri dari tiga level tegangan yaitu: AC *low* pada bagian terminal motor, karenan adanya dua freewheeling yang konduksi setiap *state* maka pada antara terminal fasa dimana dioda sedang konduksi akan terbentuk tegangan DC *low*. Melalui proses pensaklaran, maka akan didapatkan level tegangan DC *high* pada terminal baterai sehingga terjadi regenerasi energi ke baterai.



Gambar 2.18 Proses kerja sistem pengereman regeneratif secara terpisah.

Persamaan dasar untuk mencari kapasitor kompensasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$C_R = \frac{(V_{max} - V_{min})}{f \cdot R \cdot \Delta V_o} \quad (2-58)$$

dimana $(V_{max} - V_{min})$ merupakan tegangan maksimum dan minimum gelombang, f merupakan frekuensi gelombang, R merupakan resistansi beban, ΔV_o merupakan *ripple* tegangan yang diizinkan.

Oleh karena pada sistem ini terdapat perbedaan level tegangan, maka persamaan di atas harus dikembangkan. “ $0,23E_{max}'$ ” merupakan *ripple* tegangan yang telah disetarakan sisi DC *high*. “ $6f_e$ ” menunjukkan frekuensi gelombang keluaran penyearah sebesar 6 kali frekuensi elektrik gelombang AC. “ R_b ” merupakan resistansi beban pada sisi tegangan DC *high*. “ ΔV_o ” merupakan *ripple* tegangan pada sisi DC *high*.

$$C_R = \frac{0,23E_{max}'}{6.f_e.R_b.\Delta V_o} \quad (2-59)$$

Karena $f_e = \frac{n_r.p}{120}$, dimana p adalah jumlah kutub motor (dalam penelitian ini kutub motor BLDC sebanyak 56), n_r adalah putaran rotor dalam rpm. Dengan mengingat hubungan $V_s = 1,6554.E_{max}$ dari pembahasan sebelumnya, maka dapat diturunkan persamaan sebagai berikut :

$$C_R = \frac{0,23 \frac{V_s'}{1,65541}}{6 \frac{n_r.p}{120} . R_b . \Delta V_o} \quad (2-60)$$

V_s' merupakan tegangan DC efektif yang telah disetarakan sisi tegangan tinggi, yang artinya $V_s' = V_o$.

$$C_R = \left(\frac{(0,23). (120)}{(6). (56). (1,65541)} \right) \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) . n_r . R_b} \right]$$

Dengan menyederhanakan konstanta persamaan, maka didapatkan persamaan 2-61 untuk mencari nilai kapasitor untuk kompensasi *ripple* tegangan akibat *freewheeling*.

$$C_R = 0,049621 \times \left[\frac{1}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) . n_r . R_b} \right] \quad (2-61)$$

dengan:

C_R = kapasitor kompensasi *ripple freewheeling* dioda.

2.4 Kontroler

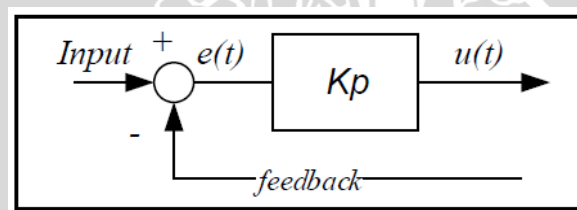
Dalam sebuah sistem, komponen penyusun sistem harus diterima sebagaimana adanya, sehingga karakteristik *plant* juga tidak dapat dirubah. Untuk dapat merubah perilaku suatu sistem diperlukan suatu kontroler. Kontroler akan mengkompensasi perilaku suatu *plant* dalam sistem. Dengan demikian perilaku sistem dapat mendekati perilaku yang diinginkan oleh pembuat. Kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem.

Salah satu kegunaan dari kontroler adalah untuk mengurangi atau menghilangkan sinyal *error*, agar keluaran sistem sesuai dengan yang diharapkan. Sinyal *error* didefinisikan sebagai selisih nilai *setpoint* dengan nilai *output plant*. *Setpoint* adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan *output plant* adalah nilai aktual yang terukur pada *output plant*. Salah satu indikator kontroler disebut baik adalah ketika sinyal *error* yang terjadi bernilai kecil. Fungsi yang lain dari kontroler adalah mempercepat respon sistem namun juga harus menekan *overshoot* pada respon sistem. Sistem kontrol modern bahkan dapat mengantisipasi *noise*/gangguan (*robust*), dan bahkan dapat beradaptasi terhadap perubahan *setpoint* ataupun *plant*.

Prinsip kerja kontroler secara sederhana adalah menentukan selisih nilai antara *output plant* dengan nilai *setpoint*, dan menghasilkan sinyal kontrol untuk menggerakkan aktuator, agar keluaran sistem sesuai dengan *setpoint*.

2.4.1 Kontroler Proporsional

Output kontroler proporsional memiliki nilai yang sebanding dengan besarnya sinyal *error*. K_p hanya berlaku sebagai Gain (penguat) saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Penggunaan kontrol P memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamik ini. Penambahan nilai K_p akan mempercepat respon *transient* dan mengurangi *error steady state*, namun tidak menghilangkannya. Nilai K_p yang terlalu besar akan menyebabkan respon sistem berosilasi. Gambar 2.19 menunjukkan diagram blok kontroler proporsional.



Gambar 2.19 Diagram Blok Kontroler Proporsional.

Sumber: Putra (2015: 5).

dimana:

K_p = adalah *gain* proporsional

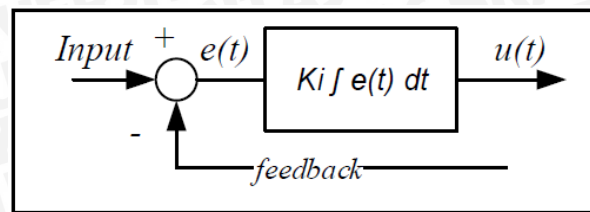
$e(t)$ = sinyal *error*

$u(t)$ = *output* kontroler

2.4.2 Kontroler Integral

Kontroler Integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol (*Error Steady State* = 0). Kontroler Integral diperlukan karena kontroler proporsional hanya mampu mengurangi *Error Steady State*, tetapi tidak dapat

menghilangkannya. Gambar 2.20 menunjukkan diagram blok kontroler integral.



Gambar 2.20 Diagram Blok Kontroler Integral.
Sumber: Putra (2015: 6).

dimana:

K_i = adalah *gain* integral

$e(t)$ = sinyal *error*

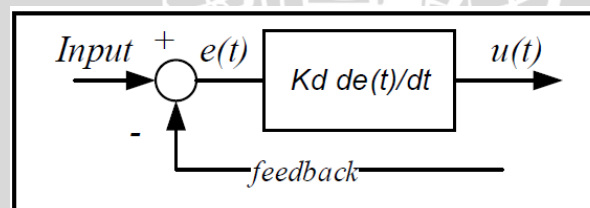
$u(t)$ = *output* kontroler

Kontroler *integral* berfungsi untuk menghilangkan sinyal *error* pada keadaan *steady state*. Namun, pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon *transient* yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan *output* berosilasi karena menambah *orde system*.

2.4.3 Kontroler *Derivative*

Kontroler *derivative* memiliki sifat seperti suatu operasi turunan. Perubahan yang mendadak pada masukan kontroler mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Kontrol Diferensial hanya berubah saat ada perubahan *error* sehingga saat *error* statis kontrol ini tidak akan bereaksi sehingga tidak akan mempengaruhi keadaan mantap.

Gambar 2.21 menunjukkan diagram blok kontroler *derivative*.



Gambar 2.21 Diagram Blok kontroler *Derivative*.
Sumber: Putra (2015: 6).

dimana:

K_d = adalah *gain* derivative

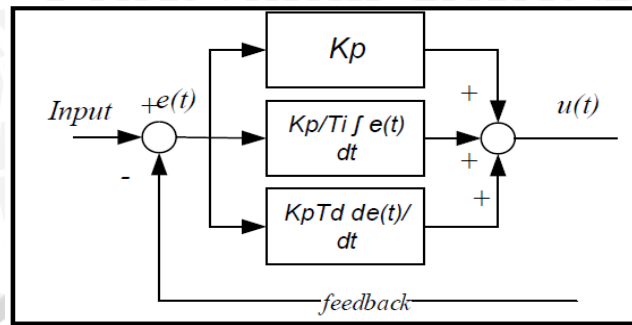
$e(t)$ = sinyal *error*

$u(t)$ = *output* kontroler

Dengan meningkatkan nilai K_d , dapat meningkatkan stabilitas sistem dan mengurangi *overshoot* sistem.

2.4.4 Kontroler PID

Gambar 2.22 menunjukkan gabungan aksi kontrol proporsional, integral, dan *derivative*.



Gambar 2.22 Diagram Blok Kontroler PID.
Sumber: Putra (2015: 7).

dimana:

K_p = adalah penguatan *proportional*

T_i = adalah waktu integral

T_d = adalah waktu *derivative*

$e(t)$ = sinyal *error*

$u(t)$ = output kontroler

T_i merupakan waktu yang digunakan untuk mengatur aksi kontrol internal sedangkan T_d adalah waktu internal dengan laju aksi kontroler proporsional. Sinyal Keluaran PID didapat dari persamaan berikut:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2-62)$$

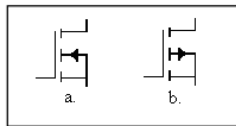
Untuk mengontrol motor kotroler PI saja sudah mencukupi. Apabila yang digunakan kontroler PI saja maka persamaannya sebagai berikut:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt) \quad (2-63)$$

(Putra, D.A., 2015: 7)

2.5 MOSFET

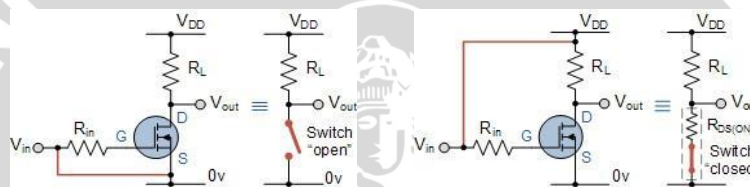
MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) merupakan salah satu jenis transistor yang memiliki impedansi masukan (*gate*) sangat tinggi (hampir tak berhingga) sehingga dengan menggunakan MOSFET sebagai saklar elektronik, memungkinkan untuk menghubungkannya dengan semua jenis gerbang logika. MOSFET dapat digunakan untuk mengendalikan beban dengan arus yang tinggi dan biaya yang lebih murah daripada menggunakan transistor bipolar (Hariyanto, A.E., 2015:15-17).



Gambar 2.23 Simbol Transistor MOSFET Mode *Enhancement*. (a) N-Channel *Enhancement* (b) P-Channel *Enhancement*.

Sumber: Purnama (2012:1).

Untuk membuat MOSFET sebagai saklar maka harus menggunakan MOSFET pada kondisi saturasi (on) dan kondisi *cut-off* (off). Pada daerah *cut-off* MOSFET tidak mendapatkan tegangan input ($V_{in} = 0$ V) sehingga tidak ada arus drain I_D yang mengalir. Kondisi ini akan membuat tegangan $V_{DS} = V_{DD}$. Pada daerah saturasi MOSFET mendapatkan bias input (V_{GS}) secara maksimum sehingga arus drain pada MOSFET juga akan maksimum dan membuat tegangan $V_{DS} = 0$ V. Pada kondisi saturasi ini MOSFET dapat dikatakan dalam kondisi on secara penuh (*fully-on*).



Gambar 2.24 Rangkaian pengganti MOSFET saat beroperasi pada daerah (a) *cut-off*. (b) saturasi.

Sumber: Purnama (2012:1).

Karakteristik MOSFET pada daerah *cut-off* antara lain:

1. Input *gate* tidak mendapat tegangan bias karena terhubung ke *ground* (0 V).
2. Tegangan *gate* lebih rendah dari tegangan *threshold* ($V_{GS} < V_{th}$).
3. MOSFET *off* total pada daerah *cut-off* ini.
4. Tidak arus *drain* yang mengalir pada MOSFET.
5. Tegangan keluaran $V_{out} = V_{DS} = V_{DD}$.
6. MOSFET dianalogikan sebagai saklar kondisi terbuka.

Karakteristik MOSFET pada daerah saturasi antara lain:

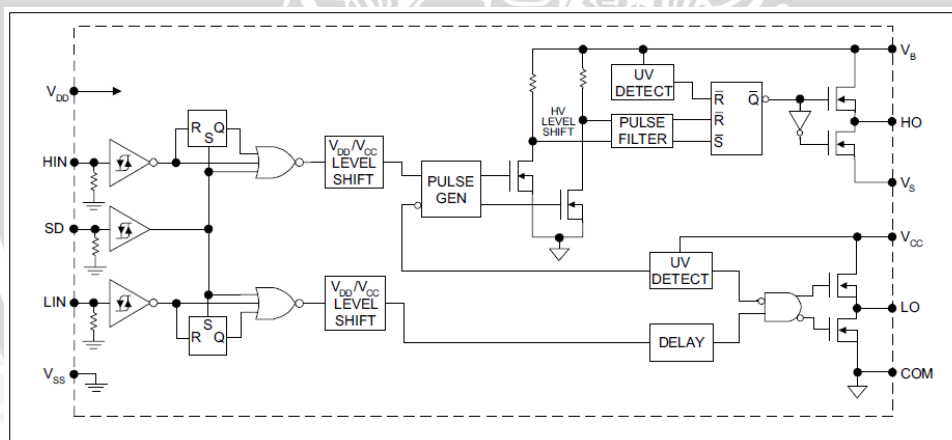
1. Tegangan input *gate* (V_{GS}) tinggi.
2. Tegangan input *gate* (V_{GS}) lebih tinggi dari tegangan *threshold* ($V_{GS} > V_{TH}$).
3. MOSFET konduksi (*fully-on*) pada daerah saturasi.
4. Tegangan *drain* dan *source* ideal (V_{DS}) pada daerah saturasi adalah 0 V.
5. Resistansi *drain* dan *source* sangat rendah ($R_{DS} < 0,1 \Omega$).
6. Tegangan keluaran $V_{out} = V_{DS} = 0,2$ V ($R_{DS} \cdot I_D$)
7. MOSFET dianalogikan sebagai saklar kondisi tertutup.

2.6 MOSFET Gate Driver (MGD)

Beberapa jenis transistor MOSFET, salah satunya IR3710 membutuhkan tegangan V_{GS} sebesar 12 volt agar terjadi saturasi pada MOSFET. Untuk mewujudkan mode saturasi pada MOSFET yang menyusun rangkaian inverter, maka besar tegangan V_G pada MOSFET *low side* adalah sebesar 12 V, sedangkan pada MOSFET *High side* $V_G = 12V + V_s$. Dimana V_s adalah tegangan *floating* (tegangan beban) pada rangkaian *bridge* inverter.

MOSFET Gate Driver (MGD) adalah IC yang mempunyai input tegangan rendah dan mempunyai keluaran tegangan yang lebih tinggi digunakan untuk mengendalikan *gate* MOSFET dengan beban pada sumber. Apabila tegangan V_s tinggi, dibutuhkan V_{GS} yang lebih tinggi pula, sehingga dibutuhkan *MOSFET Gate Driver*. *MOSFET Gate Driver* akan menghasilkan tegangan yang lebih tinggi pada *gate high side* MOSFET dan *gate low side* MOSFET. Penggunaan *gate drive* pada sisi *high-side* MOSFET ditunjukkan sebagai berikut:

1. Tegangan *gate* harus 10V sampai 15V atau lebih dari tegangan *source*.
2. Tegangan *gate* dapat dikontrol dengan referensi ground.
3. Daya yang diserap rangkaian *gate drive* tidak terlalu mempengaruhi efisiensi keseluruhan.



Gambar 2.25 blok diagram IR2110.

Sumber: Datasheet IR2110.

Bootstrap dioda dan kapasitor adalah komponen tambahan dalam aplikasi PWM. Tegangan kapasitor *bootstrap* dicatu dari V_{CC} . Untuk menentukan kapasitansi kapasitor diperlukan didapat dari parameter berikut:

1. Tegangan *gate* untuk MOSFET
2. I_{QBS} , arus *quiescent* untuk *high-side driver*
3. Arus dalam IC *control shifter*
4. Arus bocor MGT *gate-source*
5. Arus bocor kapasitor *bootstrap*

Nilai minimal kapasitor *bootstrap* dihitung dengan persamaan:

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \quad (2-64)$$

Dimana:

Q_g = Gate charge of high-side FET.

f = Frekuensi pensaklaran .

$I_{Cbs(leak)}$ = Arus bocor kapasitor *bootstrap*.

$I_{qbs(max)}$ = Arus *quiescent* maksimum V_{BS} .

V_{CC} = Catu tegangan untuk logika kontrol.

V_f = Jatuh tegangan diode *bootstrap*.

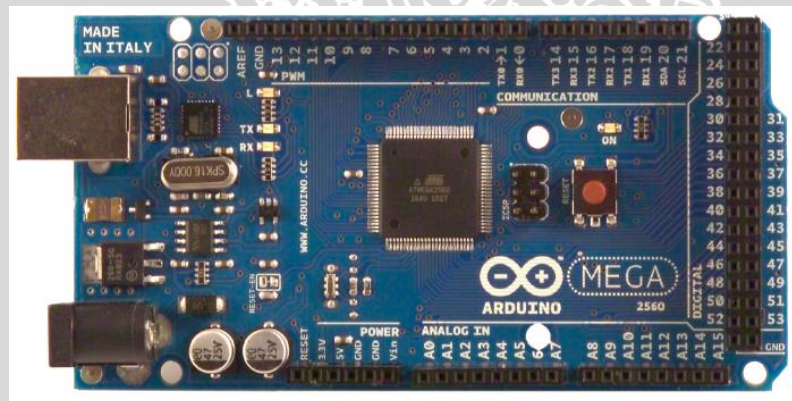
V_{LS} = Jatuh tegangan pada *low-side* FET atau beban.

V_{Min} = Tegangan minimum antara V_B and V_S .

Q_{ls} = level shift charge required per cycle.

(Hamdi, I., T. 2015:16)

2.7 Mikrokontroler Arduino Mega



Gambar 2.26 Arduino Mega 2560

Sumber : Datasheet Arduino Mega.

Gambar 2.26 merupakan modul Arduino mega 2560, diana sudah dilengkapi sistem clock, input-output dan memori. Arduino mega 2560 merupakan sebuah board mikrokontroler berbasis ATmega2560. Modul ini memiliki 54 digital input/output dimana 14 digunakan untuk PWM output dan 16 digunakan sebagai analog input, 4 port serial, 16 MHz osilator Kristal, koneksi USB, *power jack*, *ICISP Header*, dan tombol reset. Memiliki flash memory sebesar 256KB sangat cukup untuk menampung program yang banyak.

Arduino mega 2560 tidak memerlukan *flash* program *external* karena di dalam chip mikrokontroler Arduino telah diisi dengan *bootloader* yang membuat proses upload program yang kita buat menjadi lebih sederhana dan cepat. Untuk koneksi dengan komputer sudah

tersedia RS232 to TTL *converter* atau menggunakan *chip* USB ke serial *converter* seperti FTDI FT232.

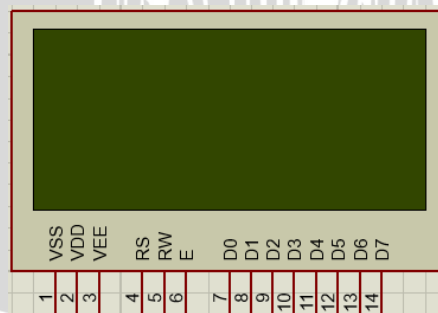
ATMega2560 juga menyediakan 4 buah timer 16 bit (timer1, timer3, timer4, timer5), dan 2 buah timer 8 bit (timer 0 dan timer 2).

Arduino Mega 2560 memiliki spesifikasi kerja sebagai berikut:

- *Operating* 5V.
- *Input Voltage* (rekomendasi) 7-12V.
- *Input Voltage* (batas) 6-20V.
- Digital I/O Pins 54 termasuk 14 pin output PWM Analog Input Pins 16.
- DC Current per I/O Pin 40 mA.
- DC Current for 3.3V Pin 50 mA.
- Flash Memory 8 KB dari 256 KB digunakan oleh *bootloader*.
- SRAM 8 KB.
- EEPROM 4 KB *Clock Speed* 16 MHz.

2.8 Liquid Crystal Display (LCD)

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan komponen elektronika yang digunakan untuk menampilkan karakter baik berupa karakter angka, huruf, atau karakter lainnya, sehingga tampilan tersebut dapat dilihat secara visual. LCD terbuat dari bahan kristal cair yang merupakan suatu komponen organik yang mempunyai sifat optik seperti benda padat meskipun bahan tetap cair. Gambar 2.27 menunjukkan rangkaian *interface* ke LCD Karakter 4X16, terdapat pin 1 sampai dengan 14 untuk menjalankan LCD.



Gambar 2.27 Rangkaian *Interface* ke LCD Karakter 2X16.

Sumber : Dokumen penulis.

Pada perancangan sistem ini memakai LCD modul M1632 yang merupakan sebuah modul LCD dot matrik yang membutuhkan daya kecil. LCD modul M1632 dilengkapi panel LCD dengan tingkat kontras yang cukup tinggi serta pengendali LCD CMOS yang telah terpasang dalam modul tersebut. Tabel 2.1 menunjukkan PIN I/O LCD.

Tabel 2.1 I/O LCD

INTERFACE PIN FUNCTION		
PIN NO.	SYMBOL	FUNCTION
1	V_{SS}	Ground
2	V_{DD}	+ 3 V or + 5 V
3	V_0	Contrast adjustment
4	RS	H/L register select signal
5	R/W	H/L read/write signal
6	E	H → L enable signal
7	DB0	H/L data bus line
8	DB1	H/L data bus line
9	DB2	H/L data bus line
10	DB3	H/L data bus line
11	DB4	H/L data bus line
12	DB5	H/L data bus line
13	DB6	H/L data bus line
14	DB7	H/L data bus line
15	A/V_{EE}	+ 4.2 V for LED ($R_A = 0 \Omega$)/negative voltage output
16	K	Power supply for B/L (0 V)

Sumber: Datasheet LCD 4x16.

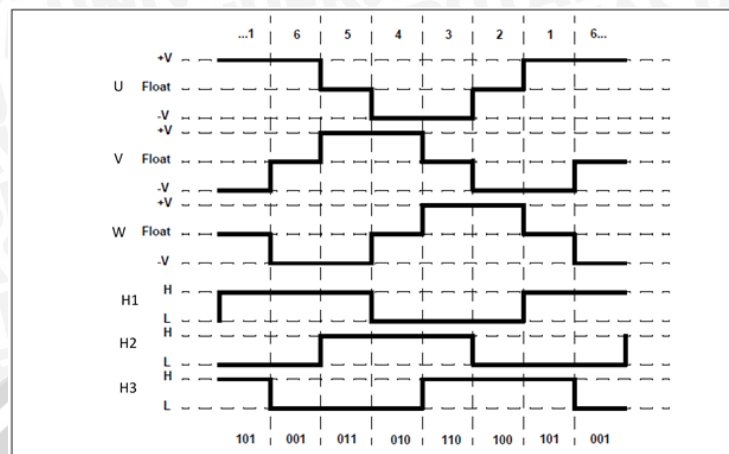
2.9 Sensor efek medan (*Hall Sensors*)

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, timing pensaklaran inverter membutuhkan informasi dari *Hall sensors*. *Hall sensors* digunakan untuk mendeteksi posisi rotor, sehingga inverter dapat menentukan fasa belitan mana yang harus mendapatkan polaritas positif ataupun negatif. Pada prinsipnya *inverter* akan menghasilkan medan putar yang akan menarik magnet permanen pada rotor, sehingga rotor akan berputar.

Secara umum motor BLDC memiliki tiga buah *Hall sensors* yang diletakkan pada stator. Setiap kali kutub magnet rotor mendekati sensor efek medan, maka sensor akan memberikan keluaran logika tinggi (*High*) untuk kutub utara dan rendah (*Low*) untuk kutub selatan. Ketiga *Hall sensors* diletakkan secara mekanik sedemikian rupa sehingga masing-masing akan berbeda sudut fasa sebesar 120° elektrik. Kombinasi dari tiga sensor efek medan akan menentukan urutan pensaklaran *inverter* agar motor dapat berputar sesuai dengan yang diharapkan.

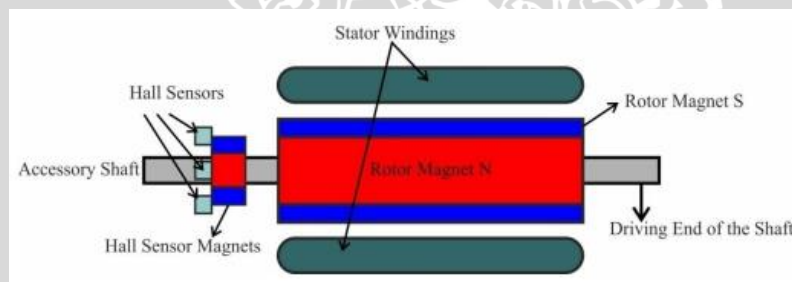
Gambar 2.28 menunjukkan perubahan kombinasi sensor terhadap *timing* pensaklaran inverter. Misalkan pada kombinasi sensor yang didapat 101, maka fasa U akan mendapatkan polaritas positif, fasa V polaritas negatif, dan fasa W dalam kondisi *floating*. Dengan menggunakan tiga sensor efek medan, maka dalam 1 siklus elektrik (360°) akan didapatkan 6 keadaan yang berbeda, dimana pada setiap keadaan dapat diatur *timing* komutasinya sesuai dengan perilaku motor yang diinginkan. Urutan sensor efek medan jika diinginkan rotasi motor searah jarum jam adalah sensor H1, sensor H2, dan Sensor H3. Untuk rotasi motor berlawanan arah jarum jam maka urutan sensor H3, sensor H2, dan sensor H1. Perubahan

timing pengendalian akan terus berlangsung menyesuaikan kombinasi sensor yang didapat dari ketiga sensor efek medan.



Gambar 2.28 Perubahan kombinasi sensor dengan polaritas tegangan tiap fasa.
Sumber: Brown (2002: 2).

Gambar 2.29 menunjukkan bagian melintang motor BLDC dengan rotor alternatif dari magnet permanen utara dan selatan. *Hall sensors* banyak digunakan dalam pendeteksian posisi rotor karena biaya pembuatan yang murah serta implementasi yang mudah.



Gambar 2.29 Penampang rotor dengan pemasangan hall sensor.
Sumber: Gamazo (2010:6908).

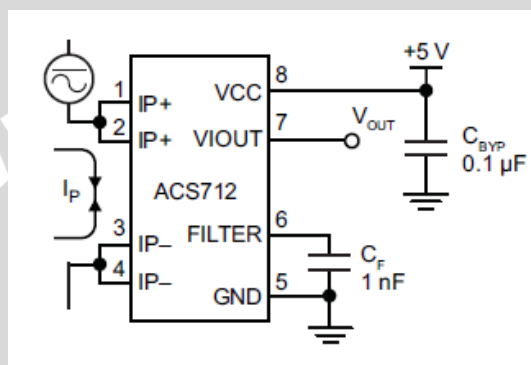
2.10 Media penyimpanan energi listrik

Energi listrik yang dapat disimpan dalam suatu baterai hanya dalam bentuk DC. Beberapa jenis baterai yang biasa dijual di pasaran adalah baterai Ni-Cd, Lithium-Ion, Lithium Polymer, Lithium Phospat, dan *Valve Regulated Lead Acid*. Baterai yang paling murah dan mudah didapatkan dipasaran adalah baterai jenis VRLA.

Kapasitas baterai dapat diketahui dengan membaca tegangan terminal atau massa jenis elektrolit. Kerapatan atau massa jenis elektrolit asam sulfat dari baterai asam timbal bervariasi sesuai *State of Charge* (SoC). Salah satu piranti yang dapat digunakan untuk mengetahui SoC baterai adalah Voltmeter. Voltmeter digital menunjukkan pembacaan tegangan dalam persentase. Saat baterai terisi maka tegangan yang ditunjukkan semakin meningkat dan saat pembuangan tegangan yang ditunjukkan semakin menurun.

2.11 Sensor Arus

ACS712 adalah sensor arus yang bekerja berdasarkan efek medan. Sensor arus ini dapat digunakan untuk mengukur arus AC atau DC. Modul sensor ini telah dilengkapi dengan rangkaian penguat operasional, sehingga sensitivitas pengukuran arusnya meningkat dan dapat mengukur perubahan arus yang kecil. Sensor ini digunakan pada aplikasi-aplikasi di bidang industri, komersial, maupun komunikasi. Contoh aplikasinya antara lain untuk sensor kontrol motor, deteksi dan manajemen penggunaan daya, sensor untuk catu daya tersaklar, sensor proteksi terhadap arus lebih, dan lain sebagainya. Konfigurasi pin sensor ACS712 ditunjukkan oleh gambar 2.30.



Gambar 2.30 Konfigurasi pin sensor arus ACS 712
Sumber: Datasheet ACS712.

Spesifikasi Sensor Arus ACS712:

1. Berbasis ACS712 dengan fitur:

- Waktu kenaikan perubahan luaran = 5 μ s.
- Lebar frekuensi sampai dengan 80 kHz.
- Total kesalahan luaran 1,5% pada suhu kerja $T_A = 25^\circ\text{C}$.
- Tahanan konduktor internal 1,2 m Ω .
- Tegangan isolasi minimum 2,1 kVRMS antara pin1-4 dan pin 5-8.
- Sensitivitas luaran 185 mV/A.
- Mampu mengukur arus AC atau DC hingga 5 A.
- Tegangan luaran proporsional terhadap masukan arus AC atau DC.

2. Tegangan kerja 5 VDC.

3. Dilengkapi dengan penguat operasional untuk menambah sensitivitas luaran.

Sensor ini memiliki pembacaan dengan ketepatan yang tinggi, karena di dalamnya terdapat rangkaian *offset* rendah linier medan dengan satu lintasan yang terbuat dari tembaga. Cara kerja sensor ini adalah arus yang dibaca mengalir melalui kabel tembaga yang terdapat didalamnya yang menghasilkan medan magnet yang di tangkap oleh IC medan terintegrasi

dan diubah menjadi tegangan proporsional. Ketelitian dalam pembacaan sensor dioptimalkan dengan cara pemasangan komponen yang ada di dalamnya antara penghantar yang menghasilkan medan magnet dengan *transducer* medan secara berdekatan.

Tabel 2.2 Fungsi pin Sensor Arus ACS712

Pin Sensor ACS712	Fungsi
IP +	Terminal yang mendeteksi arus, terdapat sekering di dalamnya.
IP -	Terminal yang mendeteksi arus, terdapat sekering di dalamnya.
GND	Terminal sinyal Ground
Filter	Terminal untuk kapasitor eksternal yang berfungsi sebagai pembatas bandwidth
V_{iout}	Terminal keluaran sinyal analog
Vcc	Terminal masukan catu daya

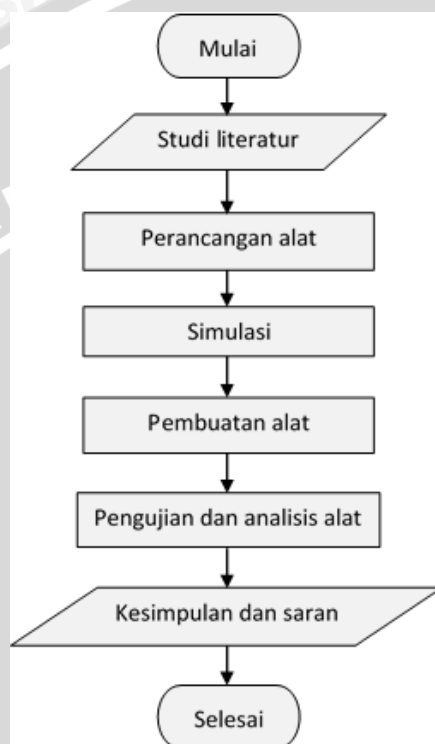
Sumber: Datasheet ACS712.

Hambatan dalam penghantar sensor sebesar $1,2 \text{ m}\Omega$ dengan daya yang rendah. Jalur terminal konduktif secara kelistrikan diisolasi dari sensor timah mengarah (pin 5 sampai pin 8). Hal ini menjadikan sensor arus ACS712 dapat digunakan pada aplikasi-aplikasi yang membutuhkan isolasi listrik tanpa menggunakan *opto-isolator* atau teknik isolasi lainnya yang mahal. Berdasarkan datasheet, IC ACS712 tipe 5A ini mempunyai sensitivitas sebesar 100 mV/A . Saat arus yang mengalir 0 A IC ini mempunyai output tegangan $2,5 \text{ V}$. Nilai tegangan akan bertambah berbanding lurus dengan nilai arus.

BAB III

METODE PENELITIAN

Proposal ini disusun berdasarkan pada masalah yang bersifat aplikatif, yaitu perencanaan dan perealisasiian alat agar dapat bekerja sesuai dengan yang direncanakan dengan mengacu pada rumusan masalah. Metode yang digunakan untuk merealisasikan alat tersebut seperti terlihat pada diagram alir gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir metodologi penelitian

3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan dasar tentang segala sesuatu yang mendukung perancangan serta pembuatan alat ini. Pembuatan alat ini menggunakan referensi dari buku-buku maupun artikel dari internet agar mengetahui prinsip kerja, karakteristik komponen, serta teori yang menunjang.

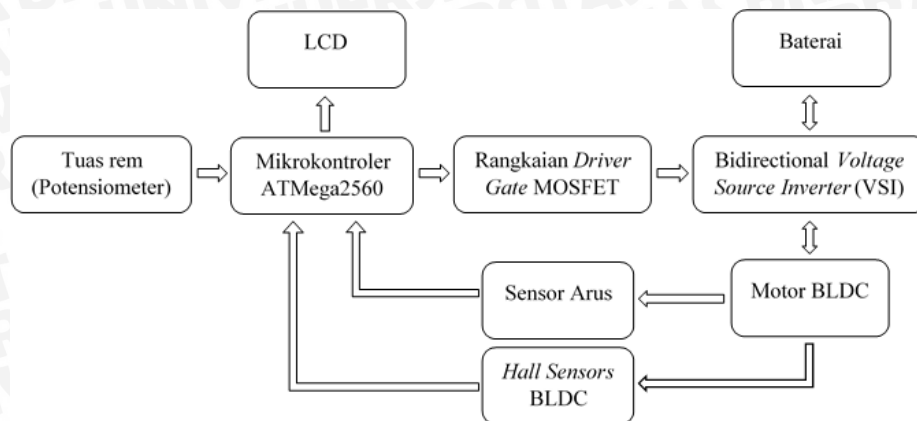
3.2 Perancangan Alat

Perancangan alat sistem pengereman regeneratif untuk pengisian baterai meliputi tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Pembuatan skematik sistem secara keseluruhan.

Skematik keseluruhan sistem merupakan gambaran dari konfigurasi elemen yang menyusun sistem. Elemen yang membentuk sistem digambarkan dalam bentuk balok. Setiap balok memiliki fungsi tertentu dalam sistem. Skematik sistem dapat

memudahkan dalam menganalisa dan merancang sistem yang akan dibuat. Gambar 3.2 menunjukkan skematik keseluruhan sistem.



Gambar 3.2 Skematik keseluruhan sistem

2. Penentuan spesifikasi alat.

Setelah pembuatan skematik sistem secara keseluruhan, maka ditentukan spesifikasi alat secara global sebagai acuan dalam perancangan selanjutnya. Spesifikasi alat yang direncanakan adalah sebagai berikut:

1. Penggerak menggunakan motor BLDC dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - Daya: 2000 Watt
 - Tegangan: 48 volt
 - Jumlah kutub: 56
 - Jumlah alur: 63
 - Hubungan belitan jangkar: Wye (Y).
2. Perancangan *Voltage Source Inverter* (VSI) menggunakan metode *six-step*.
3. MOSFET IRF3710 digunakan untuk pensaklaran *inverter*.
4. *Driver inverter* menggunakan *MOSFET Gate Driver* (MGD) sebagai kontrol pulsa pada *high side* dan *low side* MOSFET.
5. Menggunakan catu daya baterai VRLA 12V, 100 Ah diseri sebanyak 4 buah.
6. *Hall sensors* pada motor BLDC menggunakan IC fS41G1 yang sudah dipasangkan satu set dengan motor BLDC.
7. Sensor arus yang digunakan adalah ACS712.
8. Menggunakan mikrokontroler Arduino Mega (ATmega 2560) sebagai unit kontrol.
9. Alat dilengkapi LCD 4x16 karakter untuk menampilkan *setpoint* pengereman, arus pengereman, besar *error*, mode pengereman dan *duty cycle* pengereman.

3. Perancangan rangkaian beserta *rating* komponen dari masing masing balok sesuai dengan yang ada di pasaran.

Setiap balok pada skematik sistem adalah sebuah alat yang berisi berbagai komponen elektronika. Semua komponen elektronika yang ada dipasaran mempunyai spesifikasi yang berbeda-beda. Setelah menentukan spesifikasi per-balok, hal yang selanjutnya dilakukan adalah menentukan spesifikasi komponen yang digunakan pada tiap balok tersebut.

Setelah mendapatkan semua spesifikasi komponen yang dibutuhkan, tahap selanjutnya adalah mencocokkan apakah nilai tersebut ada dipasaran atau tidak. Jika tidak, maka harus dilakukan pendekatan spesifikasi hasil perhitungan dengan yang ada dipasaran.

4. Perancangan perangkat lunak

Proses kerja perangkat lunak pada sistem ini adalah mengolah sinyal masukan, menentukan besar *error*, menentukan mode pengereman, dan menentukan sinyal kontrol untuk menggerakkan inverter.

Algoritma program yang dirancang dalam sistem ini adalah menjaga arus pengereman (arus jangkar) agar sesuai dengan *setpoint* pengereman.

3.3 Simulasi

Sebelum melakukan pembuatan alat, peneliti membutuhkan simulasi guna memperkecil kemungkinan kegagalan. *Software* yang digunakan untuk melakukan simulasi adalah Simulink Matlab dan Proteus untuk menganalisis keluaran sinyal mikrokontroler dan rangkaian konverter daya.

3.4 Pembuatan alat

Pembuatan alat dalam penelitian ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu:

1. Perangkat keras.

Perangkat keras yang dibuat adalah rangkaian dari masing-masing elemen penyusun sistem sistem yang telah dirancang dan disimulasikan sebelumnya.

2. Perangkat lunak.

Perangkat lunak yang dibuat adalah program yang telah dirancang dan disimulasikan sebelumnya untuk mengendalikan keseluruhan sistem.

3.5 Pengujian dan analisis alat

Untuk menganalisis kinerja alat apakah sesuai dengan yang direncanakan maka dilakukan pengujian alat. Pengujian dilakukan pada tiap bagian dan kemudian secara keseluruhan sistem. Secara garis besar pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengujian *Back*-EMF motor BLDC

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui fungsi *Back*-EMF terhadap kecepatan. Kemudian fungsi ini akan digunakan untuk melakukan perhitungan secara teori dan juga simulasi. Perhitungan secara teori dan simulasi bertujuan untuk memeriksa kinerja sistem apakah sudah sesuai dengan yang direncanakan.

Pengujian ini dilakukan dengan cara mengoperasikan BLDC sebagai generator tanpa beban. BLDC diputar pada beberapa variasi kecepatan, kemudian nilai *Back*-EMF yang dibangkitkan pada terminal motor dicatat.

2. Pengujian Sensor Arus

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sensitifitas pembacaan sensor arus yang digunakan.

Pengujian dilakukan dengan mengalirkan arus AC pada beberapa variasi nilai, kemudian mencatat nilai puncak tegangan keluaran sensor. Nilai puncak tegangan keluaran sensor nantinya akan dideteksi oleh mikrokontroler untuk menentukan proses kontrol.

3. Pengujian sensor efek medan (*Hall sensors*) pada motor BLDC

Pengujian ini bertujuan untuk memeriksa pulsa keluaran dari *Hall sensors*. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan osiloskop untuk menentukan urutan kombinasi sensor. Beda fasa pada setiap pulsa ketiga sensor efek medan sebesar 120° .

4. Pengujian sinyal picu dari mikrokontroler.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui urutan sinyal PWM yang dihasilkan mikrokontroler Arduino. Enam pin PWM pada mikrokontroler harus dapat menghasilkan kombinasi PWM sesuai dengan topologi pensaklaran pada mode Regeneratif murni, maupun pada mode regeneratif-*plugging*. Disamping itu, pengujian ini juga bertujuan memeriksa apakah frekuensi sinyal PWM yang dihasilkan sudah sesuai dengan yang direncanakan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan osiloskop.

5. Pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran RBS.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kerja RBS. Karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran (tegangan *charging*) dibandingkan secara teori, simulasi, dan pengujian untuk mengetahui apakah sistem sudah berjalan sesuai dengan yang direncanakan.

Pengujian dilakukan dengan memasang resistor tetap 60 Ω pada sisi DC VSI. Putaran motor dipertahankan konstan sebesar 200 rpm, dan *duty cycle* dibuat bervariasi mulai dari 10% hingga 80%. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah.

6. Pengujian RBS secara *open loop*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* ketika RBS meregenerasikan energi ke baterai.

Pengujian dilakukan dengan memasang baterai 48V pada sisi DC VSI. Putaran motor dipertahankan konstan sebesar 200 rpm, *duty cycle* dibuat bervariasi mulai dari 10% hingga 80%. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah.

7. Pengujian RBS secara *close loop*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah arus pengereman sesuai dengan arus *setpoint* untuk berbagai variasi kecepatan.

Pengujian dilakukan dengan cara mengatur *setpoint* arus pengereman pada nilai tertentu, kemudian memutar motor BLDC dengan penggerak lain pada beberapa variasi kecepatan. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah.

8. Pengujian regenerasi energi

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui energi kinetik yang dapat dikembalikan ke baterai seiring perlambatan. Proses pengujian dilakukan dengan cara memutar BLDC hingga kecepatan tertentu, kemudian dilakukan pengereman dengan *setpoint* tertentu hingga motor berhenti. Arus dan tegangan pada baterai direkam dalam bentuk numerik pada osiloskop untuk menghitung energi yang dapat dikembalikan ke baterai. Pengujian ini dilakukan pada kecepatan awal motor 30 km/jam dan 40 km/jam. Pada masing-masing kecepatan dilakukan pengereman dengan *setpoint* arus 1,2,3,4,dan 5A.

3.6 Pengambilan kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian sistem secara keseluruhan. Jika hasil yang didapatkan telah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya, maka sistem kendali tersebut telah berhasil memenuhi harapan dan tentunya memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan.

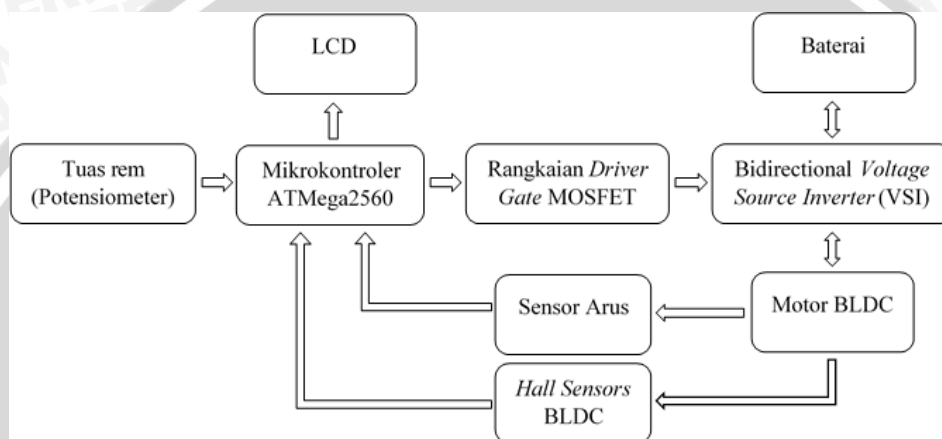


BAB IV

PERANCANGAN, SIMULASI, DAN PEMBUATAN ALAT

Perancangan dan pembuatan sistem pengereman regeneratif menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* terdiri atas dua bagian utama yaitu perancangan dan pembuatan perangkat keras serta perancangan dan pembuatan perangkat lunak. Perancangan dan pembuatan alat dilakukan secara bertahap dalam bentuk blok sehingga akan memudahkan dalam analisis pada setiap bloknya maupun secara keseluruhan.

4.1 Perancangan sistem



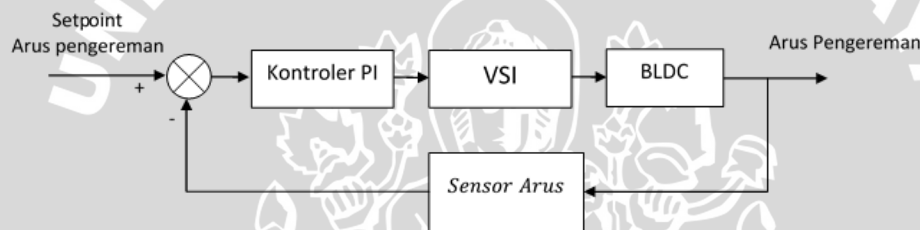
Gambar 4.1 Skematik keseluruhan sistem.

Secara garis besar, skematik sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada aplikasi sistem sesungguhnya motor BLDC diletakkan pada bagian penggerak kendaraan listrik, Baterai, Rangkaian *Driver* dan kontroler diletakkan pada bagasi kendaraan listrik, *Hall Sensors* terletak di bagian stator BLDC (satu set dengan motor BLDC), sensor arus diletakkan pada fasa A motor BLDC, dan *set point* (potensiometer) dikopel dengan tuas rem pada bagian kemudi.

Keterangan skematik sistem dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Mikrokontroler berfungsi untuk menentukan *error* antara setpoint (potensiometer) dengan nilai aktual yang dibaca oleh sensor arus, mengkoreksi *error* melalui kontroler PI untuk mendapatkan sinyal kontrol, membangkitkan sinyal PWM, menentukan topologi pensaklaran berdasarkan kombinasi *hall sensors* dan mode pengereman berdasarkan nilai *duty cycle*.
- Masukan potensiometer dengan range tegangan 0-5V sebagai masukan ADC mikrokontroler untuk mengatur setpoint arus pengereman.
- LCD berfungsi untuk menampilkan besar *error*, *duty cycle* dan mode pengereman yang sedang diterapkan.

- iv. *Driver* MOSFET berfungsi sebagai penghubung dan pengisolasi rangkaian mikrokontroler yang beroperasi pada tegangan 5 volt dengan rangkaian MOSFET yang beroperasi hingga tegangan 48 volt.
- v. *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI) pada sistem ini difungsikan sebagai konverter DC/AC saat mode *motoring* dan difungsikan dalam mode AC/DC saat regenerasi energi ke baterai.
- vi. Baterai dalam sistem ini berfungsi sebagai catu daya utama pada mode *motoring* dan beban elektrik pada mode *braking*.
- vii. Sensor arus berfungsi untuk memberikan umpan balik berupa nilai arus aktual pada belitan jangkar.
- viii. *Hall Sensors* menghasilkan keluaran berupa kombinasi sinyal digital (3 bit) untuk menentukan kombinasi pensaklaran VSI.



Gambar 4.2 Diagram blok sistem secara keseluruhan.

Gambar 4.2 menunjukkan diagram blok kontrol RBS. Secara umum sistem ini bertujuan untuk menjaga arus pengereman pada belitan jangkar motor agar sesuai dengan nilai *setpoint*. Mikrokontroler akan membaca nilai *setpoint* arus pengereman dari potensiometer, lalu kemudian dibandingkan dengan nilai arus pengereman yang terbaca pada kumparan jangkar motor saat itu. Selisih/ *error* antara kedua nilai tersebut akan digunakan untuk menentukan nilai *duty cycle* pensaklaran dan mode pengereman VSI. Ketika mode regeneratif telah mencapai *duty cycle* 90% dan arus pengereman masih berada dibawah nilai *set point*, maka mode pengereman regeneratif-*plugging* diterapkan secara otomatis. Umpan balik dari *Hall sensors* digunakan untuk menentukan nomor saklar yang harus diaktifkan/dipicu oleh mikrokontroler. Rangkaian *Driver Gate* MOSFET digunakan sebagai *buffer* antara mikrokontroler dengan VSI. *Liquid Crystal Display* (LCD) berfungsi untuk menampilkan besar *error*, mode pengereman, dan nilai *duty cycle*.

Dengan mengatur pensaklaran VSI maka arus akan mengalir dari baterai ke motor BLDC saat mode akselerasi, dan dari motor ke baterai saat mode pengereman regeneratif. Dengan kata lain VSI dalam sistem ini dapat bekerja dalam dua arah (*Bidirectional*).

Masukan *set point* (potensiometer) berfungsi untuk menentukan besar arus jangkar referensi yang diinginkan untuk menghasilkan torsi perlambatan. Data potensiometer dihubungkan ke pin ADC 0 pada mikrokontroler Arduino Mega. Data sensor arus dihubungkan dengan pin ADC 1 mikrokontroler Arduino Mega. Kedua data ini kemudian diproses dengan kontroler PI untuk mendapatkan nilai “a” yang akan digunakan untuk menentukan mode pengereman dan nilai *duty cycle* yang akan diterapkan.

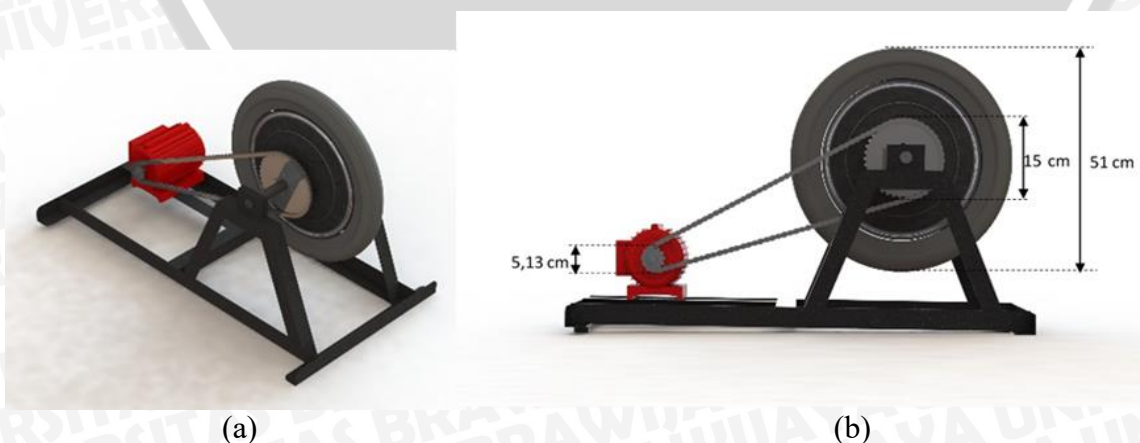
Tiga sensor efek medan (*hall sensors*) yang dipasang pada bagian stator akan memberikan umpan balik ke mikrokontroler berupa kombinasi tiga bit biner data digital. Mode pengereman dan nilai *duty cycle* yang telah didapatkan selanjutnya diolah mikrokontroler untuk menghasilkan pulsa PWM pada saklar-saklar tertentu berdasarkan nilai kombinasi dari *hall sensors*. Tabel urutan pensaklaran berdasarkan kombinasi *hall sensors* untuk mode pengereman regeneratif dan regeneratif-plugging, secara jelas ditunjukkan pada tabel *timing* komutasi pada sub bab 4.3.2 dan 4.3.3.

4.2 Perancangan perangkat keras

4.2.1 Perancangan mekanik prototype sistem pengereman regeneratif

Perancangan mekanik *prototype* sistem pengereman dilakukan dengan cara menghubungkan motor BLDC dengan motor DC *shunt* menggunakan rantai. Dalam sistem ini motor DC shunt berfungsi mengatur putaran motor BLDC. Perbandingan jumlah gigi *gear* motor DC shunt dan BLDC adalah 13:38.

Tujuan *prototype* ini adalah untuk mengkondisikan putaran motor BLDC saat pengujian pada putaran tetap, mendapatkan kondisi menyerupai kendaraan yang sedang bergerak dengan kecepatan tertentu kemudian dilakukan pengereman regeneratif menggunakan *Bidirectional VSI* pada pengujian regenerasi energi, serta mempermudah peneliti dalam proses pengamatan dan pengambilan data. *Prototype* sistem pengereman ditunjukkan pada gambar 4.3.

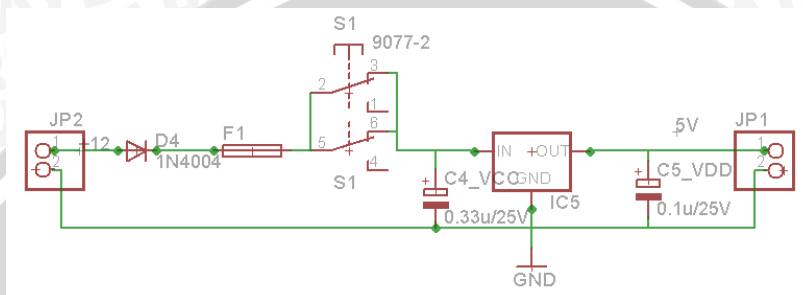


Gambar 4.3 (a) Model Prototype dalam tiga dimensi. (b) perbandingan diameter gigi.

4.2.2 Perancangan rangkaian elektronika

4.2.2.1 Perancangan catu daya

Sensor arus, *Hall Sensors*, dan IC IR2110 (driver MOSFET) membutuhkan catu daya 5V, sehingga dibutuhkan rangkaian *regulator* untuk menyesuaikan tegangan menjadi 5 V dari tegangan 12 V baterai. Rangkaian regulator menggunakan IC *positif voltage regulator* LM7805 dengan spesifikasi tegangan keluaran 5V dan arus maksimal 1 A. Rangkaian regulator tegangan ditunjukkan dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rangkaian suplai tegangan 5V.

Pada rangkaian regulator ditambahkan komponen berupa kapasitor filter C1 0,33uF dan kapasitor filter C2 0,1uF sesuai dengan *application note* datasheet LM7805. LED indikator digunakan untuk memastikan rangkaian *regulator* berfungsi dengan baik, fuse 2A digunakan untuk proteksi hubung singkat, dioda 1N4004 digunakan sebagai pengaman polaritas terbalik, dan saklar 9077-2 digunakan untuk memutus catu daya 12V.

4.2.2.2 Perancangan sistem mikrokontroler

Pada perancangan sistem ini, mikrokontroler Arduino Mega (ATMega2560) digunakan sebagai pengolah utama algoritma. Konfigurasi pin I/O dari ATMega2560 ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Daftar penggunaan pin ATMega2560

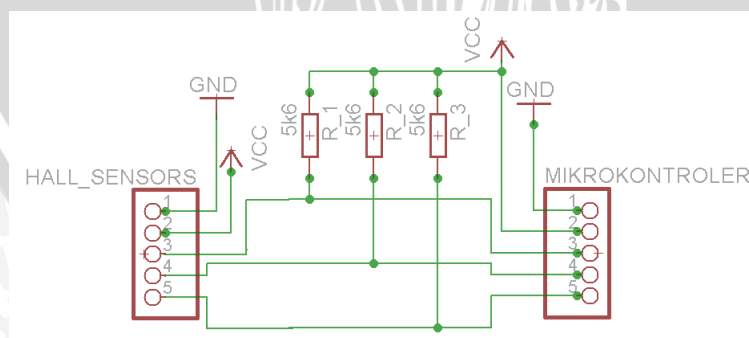
Pin ATMega2560	Fungsi	Pin Arduino Mega
PORTB.0	Hall sensor A	Pin 51
PORTB.1	Hall sensor B	Pin 52
PORTB.2	Hall sensor C	Pin 53
PORTB.5	Pulsa PWM S1	Pin 11
PORTH.4	Pulsa PWM S2	Pin 7
PORTE.3	Pulsa PWM S3	Pin 5
PORTB.6	Pulsa PWM S4	Pin 12
PORTH.3	Pulsa PWM S5	Pin 6

PORTE.4	Pulsa PWM S6	Pin 2
PORTF.0	Masukan potensiometer	ADC0
PORTF.1	Masukan Sensor Arus	ADC1
PORTC.2	Pin LCD	35
PORTC.4	Pin LCD	33
PORTC.6	Pin LCD	31
PORTA.7	Pin LCD	29
PORTA.5	Pin LCD	27
PORTA.3	Pin LCD	25

Total penggunaan pin yang digunakan adalah 15 pin digital dan 2 buah pin analog. Untuk pensaklaran 6 FET dalam mode PWM digunakan *timer* 16 Bit sebanyak 3 buah (*timer1*, *timer3*, *timer4*). Kedua hal ini menjadi alasan pemilihan mikrokontroler ATmega2560 dalam sistem ini. Dalam perancangan ini *clock* mikrokontroler menggunakan internal *clock* dengan frekuensi 16MHz.

4.2.2.3 Perancangan rangkaian pull up sensor efek medan motor BLDC

Untuk mendapatkan informasi posisi rotor motor BLDC maka digunakan tiga sensor dengan tipe *single hall effect latch* FS41. Sensor ini terletak di bagian stator motor BLDC (satu set dengan motor BLDC). Namun demikian sinyal keluaran *Hall sensors* tidak dapat langsung di umpanbalikkan ke mikrokontroler karena belum berupa sinyal diskrit yang berlogika 0 atau 5 volt, sehingga diperlukan rangkaian *pull up/ open collector* untuk mengkondisikan sinyal keluaran *Hall sensors*. Rangkaian *pull up* sensor efek medan pada motor BLDC ditunjukkan pada gambar 4.5.

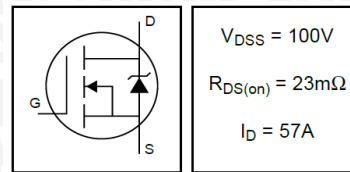


Gambar 4.5 Rangkaian *open collector hall effect*.

Pada rangkaian ini dipasang resistor *pull-up* 5,6 k Ω . Pada *datasheet*, arus *Ic* maksimal sensor efek medan 50mA. Sedangkan dengan menambahkan resistor *pull-up*, maka arus yang mengalir sebesar 0.9 mA. Hal ini sudah sesuai dengan *datasheet* pada IC FS41.

4.2.3 Perancangan *inverter* tiga fasa *six step*

Perancangan *inverter* tiga fasa menggunakan enam buah MOSFET kanal-N dengan tipe IRF3710. Skematik komponen dapat dilihat pada gambar 4.6.

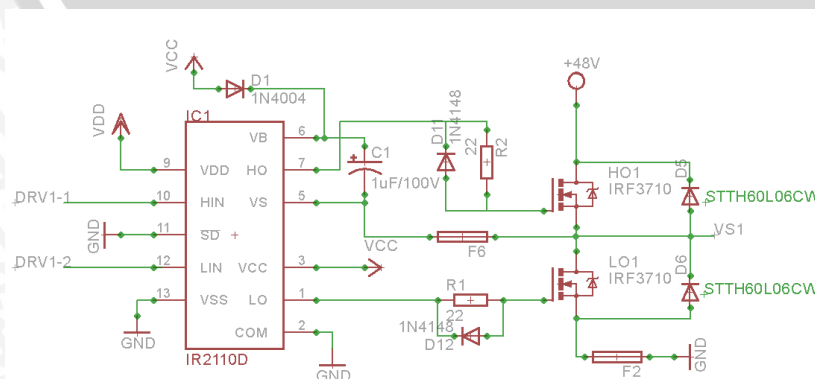


Gambar 4.6 MOSFET IRF3710.
Sumber : Datasheet IR3710 - 1

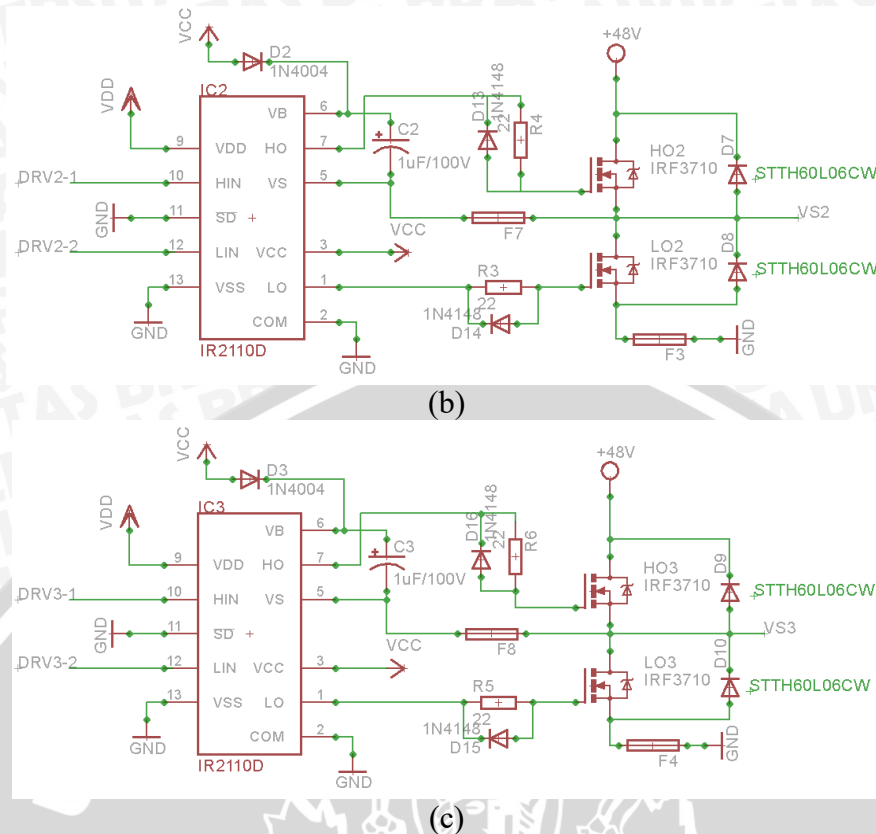
MOSFET ini dipilih karena memiliki *rating* maksimum tegangan dan arus yang tinggi sehingga diharapkan mampu menanggung beban motor BLDC. MOSFET IRF3710 juga memiliki R_{DS} yang kecil dibanding MOSFET jenis lain yang ada dipasaran sehingga rugi konduksi MOSFET juga kecil.

Pin *gate* MOSFET membutuhkan tambahan driver untuk picu dari mikrokontroler. Urutan pemecuan pada keenam MOSFET dilakukan sesuai mode yang diinginkan. urutan pemecuan secara jelas diberikan pada tabel *timing* komutasi. IC *High and Low Side Driver* IR2110 dipilih karena mampu memberi picu MOSFET secara bergantian. Rangkaian pensaklaran MOSFET dapat ditunjukkan pada rangkaian 4.7.

Pada pin V_{CC} diberikan tegangan 12V dan pin V_{DD} diberikan tegangan 5V. Penambahan diode yang dipasang anti paralel pada MOSFET bertujuan untuk sebagai *freewheeling diode*. *Freewheeling diode* berperan penting dalam melakukan regenerasi energi ke baterai ketika proses regeneratif berlangsung. Dioda STTH60L06CW dipilih sebagai *freewheeling diode* karena mempunyai *reverse recovery time* yang kecil sehingga dapat digunakan pada frekuensi pensaklaran yang tinggi. Disamping itu, dioda STTH60L06CW dapat menghantarkan arus hingga 60 ampere, dan tegangan reverse maksimum sebesar 600V, sehingga aman digunakan dalam sistem ini.



(a)



Gambar 4.7 Rangkaian *inverter* (a) fasa A, (b) fasa B, (c) fasa C

Penambahan *fuse* dimaksudkan sebagai pengaman hubung singkat dan arus lebih pada sisi MOSFET. Komponen Dioda D1/D2/D3 dan C1/C2/C3 adalah penambahan rangkaian *bootstrap* untuk memberikan picu *high-side*. Nilai kapasitor akan berpengaruh terhadap maksimum frekuensi pensaklaran yang digunakan. Besaran nilai pada kapasitor *bootstrap* ditentukan dengan rumus berikut:

$$C \geq \frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \quad (4-1)$$

Dengan melihat data dari MOSFET IRF3710 dan *driver* IR2110, maka didapat nilai sebagai berikut:

$$C \geq \frac{2 \left[2 \times 130nC + \frac{230\mu A}{25000} + 5nC + \frac{0}{25000} \right]}{12 - 0,7 - 1,5 - 0}$$

$$C \geq 55,96 \times 10^{-9} F$$

Nilai perhitungan tersebut merupakan nilai minimum untuk frekuensi 25 kHz. Berdasarkan hal tersebut peneliti memilih menggunakan kapasitor sebesar 1 uF/100V sebagai *bootstrap*, karena nilai ini dapat ditemukan dengan mudah di pasaran. Rangkaian dan perhitungan ini sudah sesuai dengan *application note* penggunaan *driver* IR2110.

4.2.4. Penentuan frekuensi *switching* dan kapasitor DC-link

Tabel 4.2 Spesifikasi Motor BLDC

Parameter	Spesifikasi
Merk	QS Motor
Tegangan nominal	48V DC
Daya nominal	2kW
Hubungan belitan	Y
Jumlah kutub	56
Jumlah alur	63
Induktor belitan (pengujian)	1400μH/fasa
Resistansi jangkar (pengujian)	0,05 Ω/fasa
Kecepatan linier maksimum	70km/jam
Putaran nominal	730 rpm

Sumber: <http://www.bogipower.com/2015/06/super-power-motor-hub.html>

Tabel 4.2 menunjukkan spesifikasi motor BLDC yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan menganggap baterai bertegangan 48V, hambatan dalam baterai sebesar 1 Ω, serta menganggap konverter bekerja ideal, maka dapat diturunkan persamaan tegangan charging (V_o) terhadap daya masukan konverter untuk arus *setpoint* 5A. *Setpoint* 5A merupakan arus pengereman terbesar dalam perancangan alat ini.

$$\sqrt{3}V_{emf,L-L} \cdot I_{a,rms} = \frac{V_o^2 - 48.V_o}{R_d} ; \cos\phi=1 \quad (4-2)$$

4.2.4.1 Perhitungan frekuensi *switching*

Apabila *ripple* arus (Δi_L) terbesar pada induktor adalah 0,4 A, dan besar induktor per fasa adalah 1400 (uH), maka frekuensi *switching* yang dibutuhkan untuk mode regeneratif dapat ditentukan oleh persamaan 2-49.

$$f_{sw} = \frac{1,35163 V_{emf,L-L} D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (\text{persamaan 2-49})$$

sedangkan frekuensi *switching* yang direkomendasikan untuk mode regeneratif-*plugging* dapat dihitung oleh persamaan 2-56.

$$f_{sw} = \frac{1,35163 V_{emf,L-L} (1 + \frac{1}{1-2D}) D}{\Delta i_a \cdot (2L)} \quad (\text{persamaan 2-56})$$

Hasil perhitungan frekuensi *switching* disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3. Terlihat bahwa frekuensi yang dibutuhkan untuk mode regeneratif adalah sebesar 11440,406 Hz, dan untuk mode regeneratif-*plugging* sebesar 21522,862 Hz. Dapat disimpulkan bahwa, agar *ripple* arus pada induktor tidak lebih dari 0,4 A, maka dibutuhkan frekuensi pensaklaran minimal sebesar 21522,862 Hz. Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan dan pembuatan program maka diambil frekuensi sebesar 25 kHz sebagai frekuensi pensaklaran MOSFET.

4.2.4.2 Perhitungan kapasitor DC-link.

Dalam perancangan alat ini diinginkan *ripple* tegangan keluaran ($\Delta V_o/V_o$) untuk proses *charging* baterai tidak lebih dari 2%. Dalam mode regeneratif nilai kapasitor kompensasi *ripple switching* dapat dihitung oleh persamaan 2-50.

$$C_{sw} = \frac{D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot f_{sw}} \quad (\text{persamaan 2-50})$$

Kapasitor kompensasi *ripple* untuk mode regeneratif-plugging dapat dihitung dengan persamaan 2-57.

$$C_{sw} = \frac{\left(1 + \frac{1}{(1-2D)}\right)D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot R_b \cdot f_{sw}} = \frac{\left(1 + \frac{1}{(1-2D)}\right)D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot f_{sw}} \quad (\text{persamaan 2-57})$$

Hasil perhitungan kapasitor kompensasi *ripple* untuk pensaklaran MOSFET disajikan dalam bentuk tabel pada lampiran 3. Terlihat bahwa kapasitor kompensasi yang dibutuhkan untuk mode regeneratif adalah sebesar 62,622 μF , dan untuk mode regeneratif-plugging adalah sebesar 133,208 μF . Dapat disimpulkan bahwa kapasitor minimal untuk kompensasi *ripple* pensaklaran adalah sebesar 133,208 μF .

Selain *ripple* tegangan akibat *switching*, *ripple* tegangan dari penyearah (*freewheeling diode*) juga harus dipertimbangkan untuk menentukan ukuran kapasitor DC-link. Apabila diinginkan *ripple* tegangan keluaran tidak lebih dari 2%, maka besar kapasitor yang harus dipasang pada sisi keluaran dapat dihitung melalui persamaan 2-61:

$$C_R = \frac{0,049621}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot \frac{V_o}{I_o} \cdot n} \quad (\text{persamaan 2-61})$$

Tabel 4.3 Perhitungan kapasitor kompensasi *ripple freewheeling* dioda

$V_{emf,L-L}$ (V)	$I_{a,rms}$ (A)	D	V_o (V)	I_o (A)	n (rpm)	$C_{min}(\mu\text{F})$ ($f_{sw}=25\text{kHz}$)
0,5	5	0,986	48,090	0,090	10	464,544
1,0	5	0,972	48,180	0,180	20	462,816
1,5	5	0,958	48,269	0,269	30	461,104
2,0	5	0,944	48,358	0,358	40	459,407
2,5	5	0,930	48,447	0,447	50	457,726
3,0	5	0,916	48,535	0,535	60	456,060
3,5	5	0,903	48,623	0,623	70	454,409
4,0	5	0,889	48,711	0,711	80	452,773
4,5	5	0,875	48,799	0,799	90	451,152
5,0	5	0,862	48,886	0,886	100	449,544
5,5	5	0,848	48,973	0,973	110	447,951
6,0	5	0,835	49,059	1,059	120	446,372
6,5	5	0,821	49,145	1,145	130	444,807
7,0	5	0,808	49,231	1,231	140	443,255

7,5	5	0,794	49,317	1,317	150	441,717
8,0	5	0,781	49,402	1,402	160	440,191
8,5	5	0,768	49,487	1,487	170	438,679

Perancangan kapasitor kompensator *ripple freewheeling* dibatasi hingga $V_{emf,LL}=0,5V$. Berdasarkan tabel 4.3, nilai kapasitor terbesar yang diperlukan nilai kapasitor sebesar 464,544 μF untuk menjaga *ripple* sisi keluaran tidak lebih dari 2%.

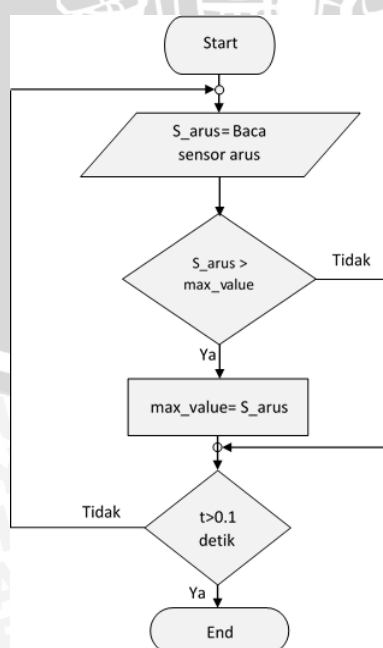
Berdasarkan nilai-nilai yang telah dihitung di atas maka dapat disimpulkan bahwa nilai frekuensi *switching* adalah sebesar 25kHz dan nilai kebutuhan kapasitor DC-link terbesar adalah 454,766 μF . Setelah nilai tersebut dicocokkan di pasaran, maka nilai kapasitor yang digunakan adalah sebesar 470 $\mu F/160V$.

4.3 Perancangan perangkat lunak

4.3.1 Pembacaan arus jangkar

Pembacaan arus dilakukan dengan menggunakan sensor arus ACS712. Sensor ini akan mengeluarkan tegangan lebih besar dari 2,5V apabila arus mengalir dari IP+ ke IP-. Untuk arah sebaliknya maka tegangan keluaran sensor akan lebih kecil dari 2,5.

Sensor arus dihubungkan seri dengan fasa “A” BLDC Motor. Pada *flow chart* terlihat bahwa proses pembacaan arus akan terjadi terus menerus dalam rentang waktu 0,1 detik. Apabila sensor membaca nilai yang lebih besar dari nilai yang sebelumnya dibaca, maka “max_value” akan di-update. Setelah nilai puncak ditemukan, maka nilai tersebut akan dikembalikan pada program utama untuk menentukan besar *error*. Berikut ini adalah algoritma pembacaan arus oleh mikrokontroler.



Gambar 4.8 Diagram alir proses pembacaan arus.

4.3.2 Algoritma pensaklaran *Voltage Source Inverter*

Algoritma pensaklaran FET pada RBS didasarkan pada informasi *hall sensors*. Tiga buah *Hall sensors* akan memberikan informasi membentuk bilangan *biner* tiga bit, sehingga akan didapatkan 6 kombinasi komutasi.

Untuk dapat mewujudkan mode pengereman regeneratif, maka kelompok saklar bernomor genap (*low side*) harus dioperasikan pada mode PWM sesuai dengan urutan sesuai dengan kombinasi *Hall sensors*, seperti yang ditunjukkan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Timing komutasi pada mode regeneratif

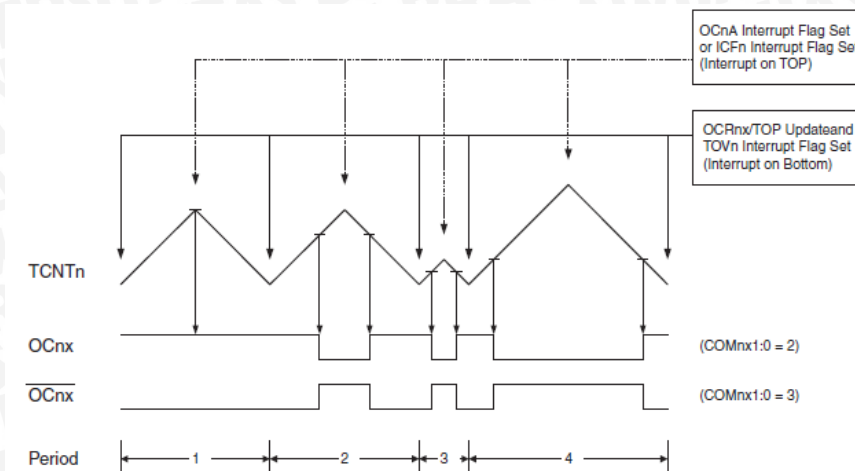
State	Kombinasi Hall(a,b,c)	S1	S3	S5	S4	S6	S2
I	101	0	0	0	1	0	0
II	100	0	0	0	1	0	0
III	110	0	0	0	0	1	0
IV	010	0	0	0	0	1	0
V	011	0	0	0	0	0	1
VI	001	0	0	0	0	0	1

Untuk dapat mewujudkan mode pengereman regeneratif-*plugging*, maka kelompok saklar bernomor genap (*low side*) harus dioperasikan pada mode PWM sesuai dengan urutan sesuai dengan kombinasi *Hall sensors*, seperti yang ditunjukkan Tabel 4.6.

Tabel 4.5 Timing komutasi pada mode regeneratif-*plugging*.

State	Kombinasi Hall(a,b,c)	S1	S3	S5	S4	S6	S2
I	101	0	1	0	1	0	0
II	100	0	0	1	1	0	0
III	110	0	0	1	0	1	0
IV	010	1	0	0	0	1	0
V	011	1	0	0	0	0	1
VI	001	0	1	0	0	0	1

Mikrokontroler Arduino sebenarnya merupakan mikrokontroler jenis ATmega 2560. Pada mikrokontroler jenis ini telah disediakan berbagai fitur untuk membangkitkan sinyal PWM. Salah satu fitur yang biasa digunakan adalah *phase and frequency correct* PWM. Proses pembangkitan PWM dengan metode *phase and frequency correct* dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Proses pembangkitan sinyal PWM dengan metode *phase and frequency correct*.

Sumber: Datasheet ATmega2560.

Pada prinsipnya TCNTn akan menghitung naik hingga nilai yang ditentukan, kemudian akan menghitung turun hingga nol. Ketika nilai OCnx > nilai TCNTn, maka akan terbentuk sinyal LOW. Dengan kata lain PWM akan 100% ketika nilai OCnx = TCNTn, dan 0% ketika OCnx = 0, sehingga *duty cycle* PWM dapat diatur dengan merubah nilai OCnx. Karena frekuensi yang digunakan dalam sistem ini adalah sebesar 25kHz, maka nilai TCNTn dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$TCNTn = \frac{f_{clk\ MK}}{2 \times f_{sw}} \quad (4-3)$$

dengan:

$f_{clk\ MK}$ = frekuensi *clock* MK (16MHz)

f_{sw} = frekuensi *switching* sistem.

sehingga

$$TCNTn = \frac{16000000}{2 \times 25000} = 320$$

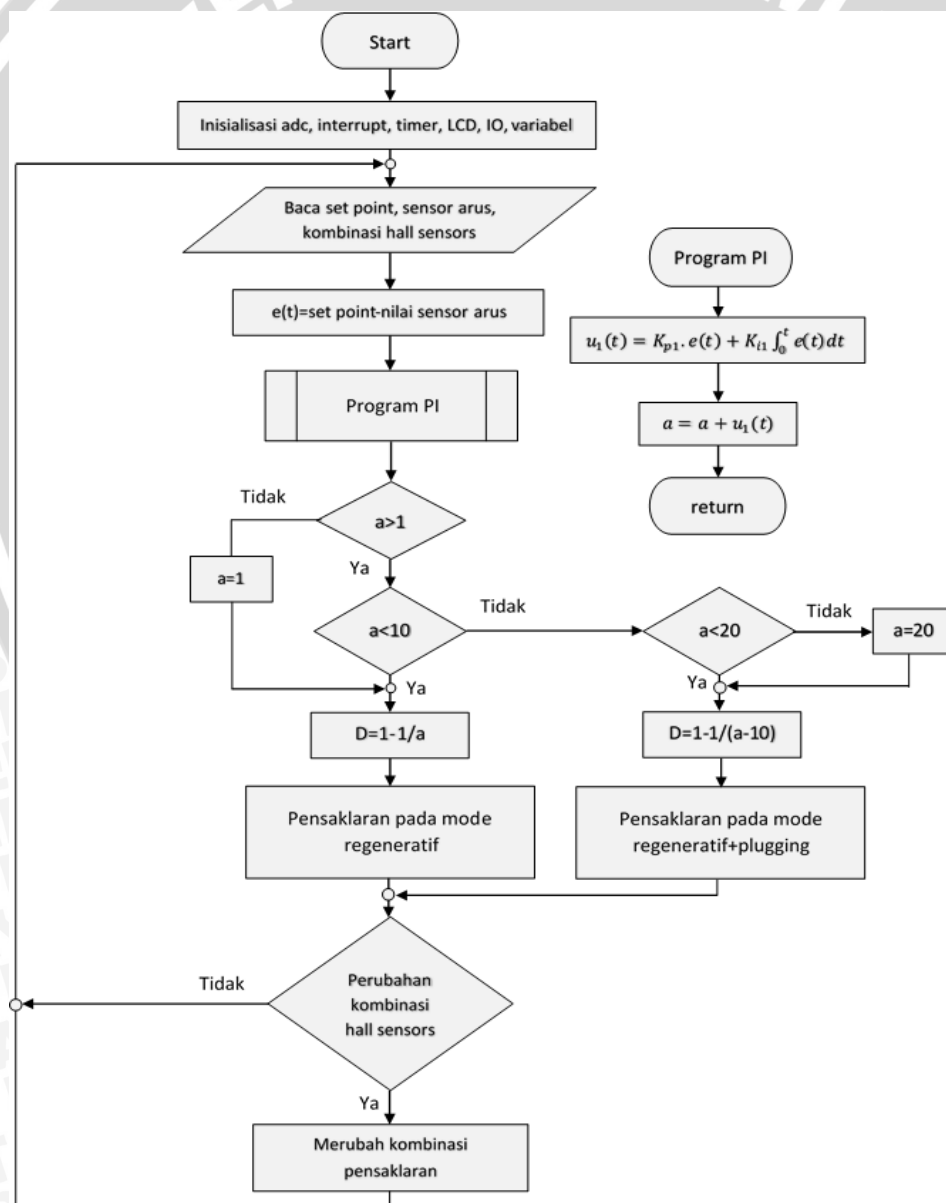
Untuk mewujudkan mode *phase and frequency correct PWM* dibutuhkan *timer* 16-bit. Satu *timer* dapat digunakan untuk menghasilkan Pulsa PWM pada dua buah pin mikrokontroler secara terpisah. Untuk dapat mengendalikan VSI diperlukan 6 buah pin yang menghasilkan sinyal PWM. Dengan alasan tersebut diambil 3 buah *timer*, yakni *Timer* 1,3,4 sebagai penghasil sinyal PWM.

4.3.3 Algoritma *Regenerative Braking System*

Untuk mewujudkan sistem pengereman elektrik dengan torsi pengereman konstan, maka akan diterapkan dua macam mode pengereman yang dapat berubah secara otomatis. Mikrokontroler diperlukan sebagai unit kendali dalam sistem *loop* tertutup. Pada

perancangan sistem ini, mikrokontroler Arduino Mega (ATMega2560) digunakan untuk menjalankan algoritma kontrol.

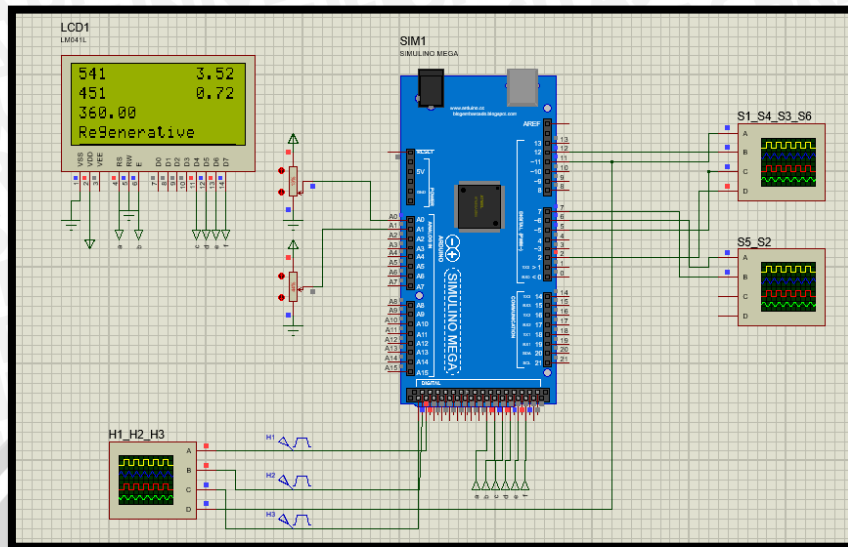
Mikrokontroler akan membaca nilai *set point*, sensor arus, dan kombinasi *Hall sensors*. Setelah itu nilai *error* akan ditentukan dari nilai *set point* dikurangi nilai sensor arus. sinyal *error* akan diolah melalui blok PI sehingga didapatkan sinyal kontrol $U(t)$. sinyal kontrol akan digunakan untuk menentukan nilai variable a seperti ditunjukkan pada diagram alir. Nilai “ a ” akan digunakan untuk menentukan nilai *duty cycle* dan mode pengereman yang akan diterapkan. Untuk $a < 10$ maka akan diterapkan mode regeneratif. sedangkan untuk nilai $a > 10$ akan diterapkan mode regeneratif-*plugging*. Apabila terjadi perubahan kombinasi *Hall sensors* maka kombinasi pensaklaran inverter akan diubah. Alur kerja program pada mikrokontroler ditunjukkan oleh gambar 4.10.



Gambar 4.10 Alur kerja program pada mikrokontroler.

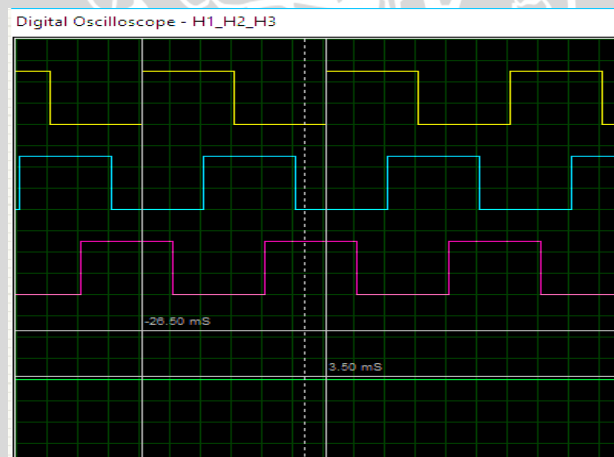
4.4 Simulasi

4.4.1 Mikrokontroler



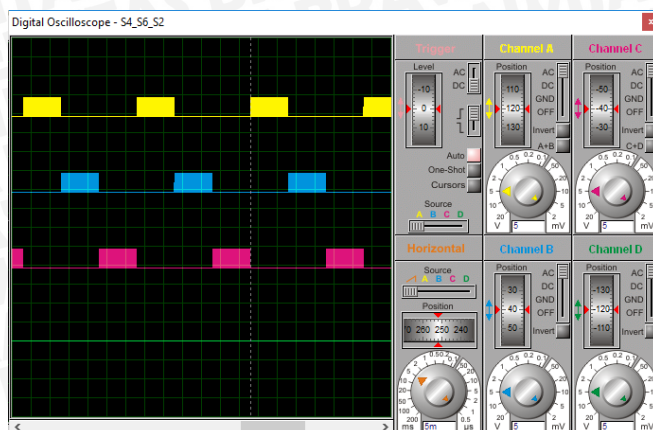
Gambar 4.11 Simulasi keluaran sinyal pada mikrokontroler.

Simulasi mikrokontroler dilakukan untuk memeriksa algoritma program dari mikrokontroler. Pada simulasi ini menggunakan aplikasi proteus 8. Rangkaian simulasi mikrokontroler ditunjukkan pada gambar 4.11. LCD akan menampilkan set point, nilai sensor arus, besar *error*, mode pengereman dan *duty cycle*.



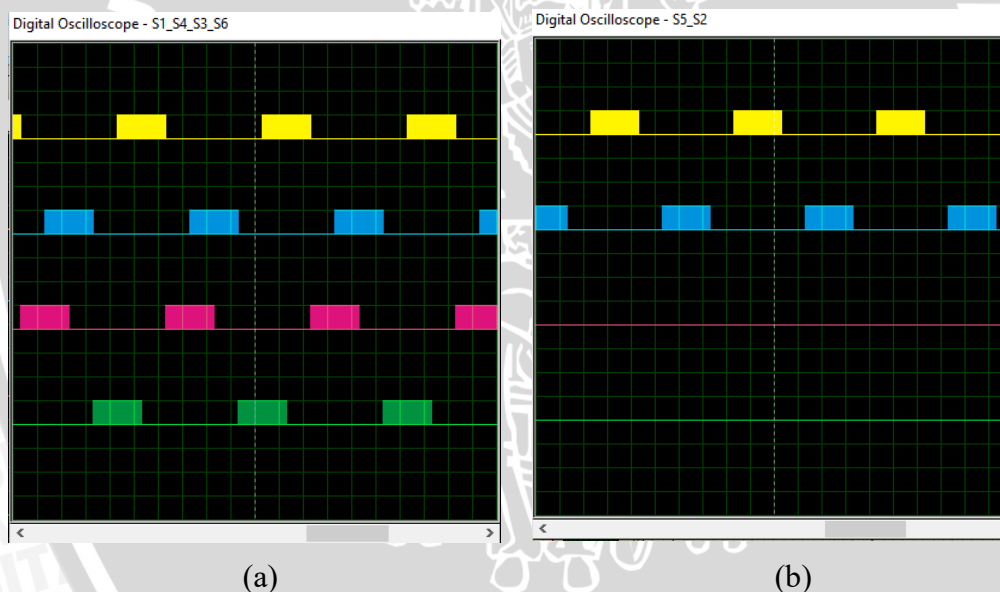
Gambar 4.12 Bentuk sinyal Hall sensors.

Simulasi pertama menunjukkan kombinasi sinyal dari tiga buah *Hall sensors* yang dipasang pada motor BLDC. Periode tiga buah *Hall sensors* pada simulasi ini adalah 30 milidetik. Dengan kata lain frekuensi elektrik motor adalah sebesar 33,33 Hz. Terlihat pada gambar 4.12 hall sensor berbeda fasa sebesar 120° sehingga akan terbentuk 6 buah kombinasi yang berbeda mulai dari 101, 100, 110, 010, 011, 001.



Gambar 4.13 Bentuk sinyal pemecuan pada mode Regeneratif.

Simulasi kedua menunjukkan sinyal keluaran mikrokontroler untuk pemecuan MOSFET pada mode regeneratif. Sinyal picu untuk S4, S6, S2 berturut- turut ditunjukkan pada gambar 4.13. Frekuensi pemecuan (*switching*) dari FET adalah sebesar 25 kHz. Terlihat bahwa sinyal picu sudah sesuai dengan urutan pensaklaran pada mode regeneratif.



Gambar 4.14 Bentuk sinyal pemecuan pada mode Regeneratif-plugging. (a) S1, S4, S3, S6 (b) S5,S2.

Simulasi ketiga menunjukkan sinyal keluaran mikrokontroler untuk pemecuan MOSFET pada mode regeneratif-plugging. Sinyal picu untuk S1, S4, S3, S6 berturut-turut ditunjukkan pada gambar 4.14a, sedangkan sinyal picu untuk S5, S2 ditunjukkan oleh gambar 4.14b. Frekuensi pemecuan (*switching*) dari FET adalah sebesar 25 kHz. Terlihat bahwa sinyal picu sudah sesuai dengan urutan pensaklaran pada mode regeneratif-plugging.

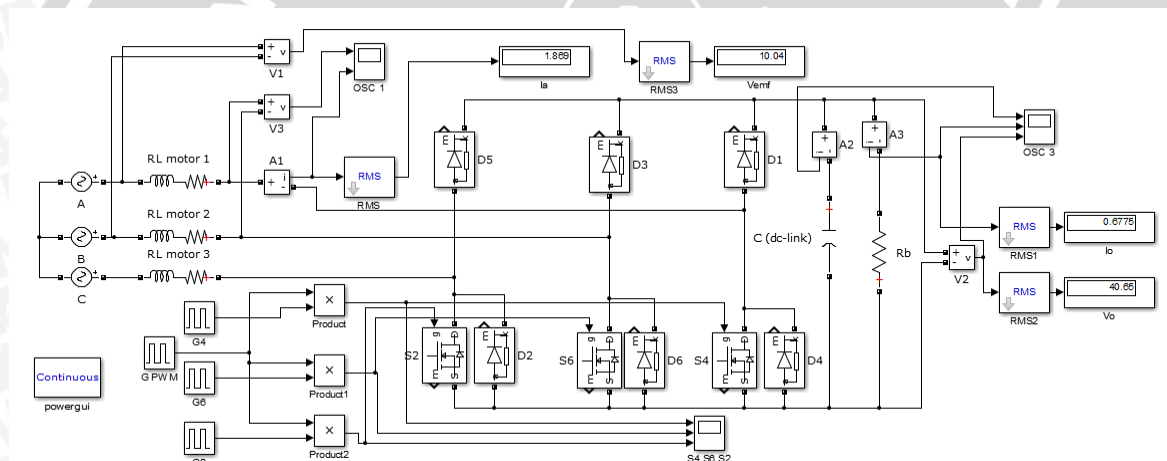
Dari keseluruhan hasil simulasi mikrokontroler, algoritma program sudah sesuai dengan yang diinginkan sehingga dapat digunakan dalam aplikasi sebenarnya.

4.4.2 VSI sebagai RBS

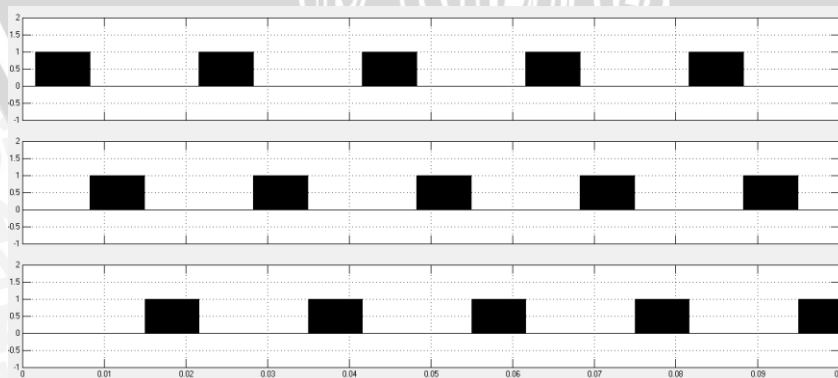
Konverter yang telah dirancang selanjutnya diuji terlebih dahulu menggunakan *software simulator* MATLAB Simulink. Dengan melakukan simulasi, diharapkan dapat memperkecil tingkat kegagalan sebelum membuat konverter yang sebenarnya. Hasil dari simulasi ini berupa nilai arus dan tegangan pada sisi sebelum dan setelah konverter. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan teori untuk mengetahui apakah kinerja dari sistem sudah sesuai dengan yang diharapkan.

4.4.2.1 Mode pengereman Regeneratif

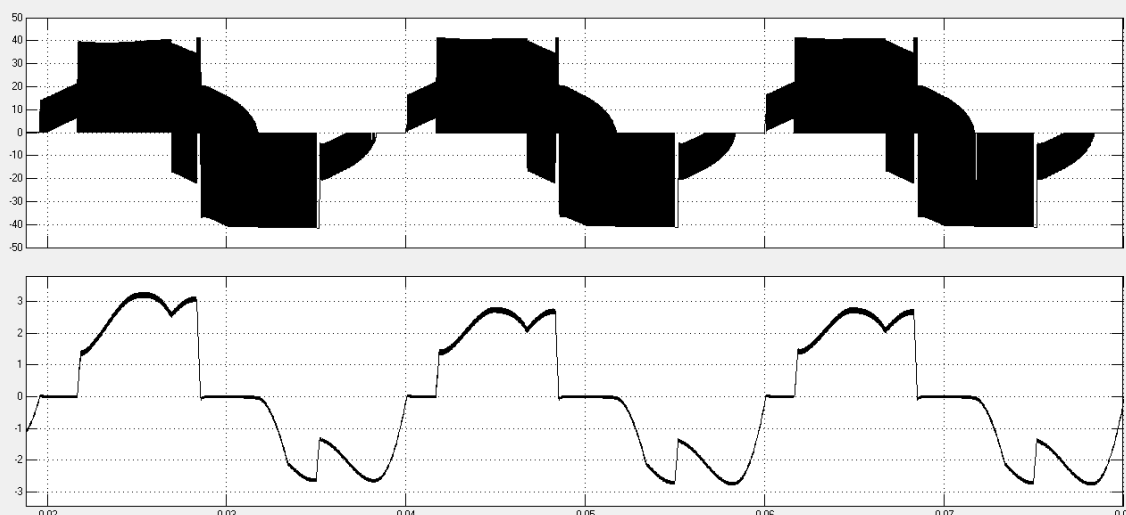
Pada simulasi ini *inverter* akan dioperasikan pada mode Regeneratif. *Duty cycle* akan dibuat bervariasi mulai dari 0,1 sampai dengan 0,8. $V_{emf,L-L}$ yang diberikan adalah sebesar 10V, dan $R=60\ \Omega$ dipasang pada sisi tegangan DC. I_a , V_o , dan I_o dicatat kemudian dibandingkan dengan perhitungan teori. Gambar 4.15 menunjukkan rangkaian simulasi menggunakan Simulink MATLAB.



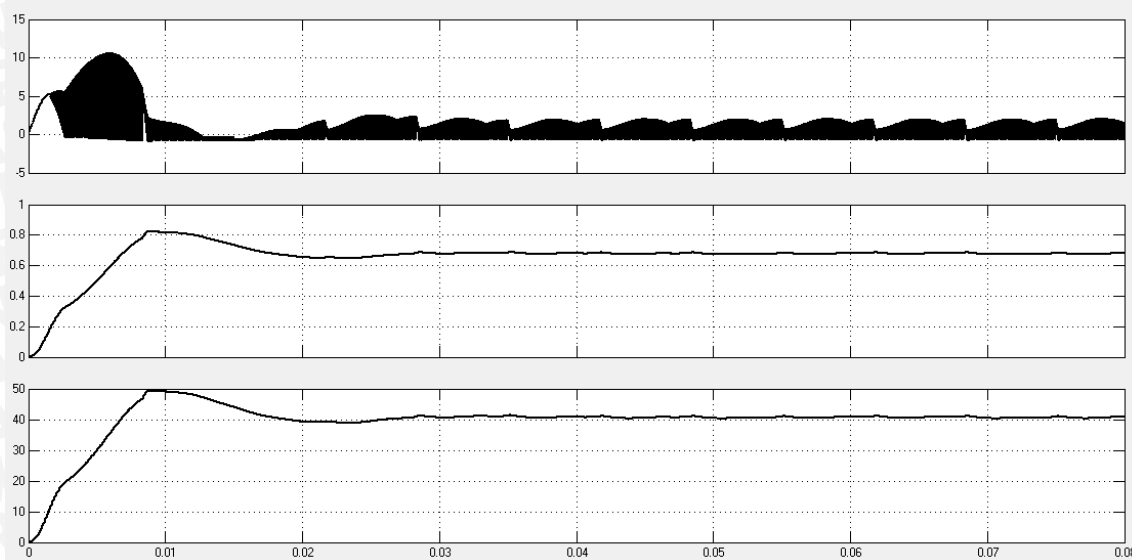
Gambar 4.15 Rangkaian simulasi VSI dalam mode Regeneratif menggunakan MATLAB.



Gambar 4.16 Urutan pensaklaran S4, S6, S2 pada pengereman mode regeneratif.



Gambar 4.17 (a) Bentuk tegangan terminal jangkar (b) Bentuk arus jangkar fasa A untuk *duty cycle* 70%.



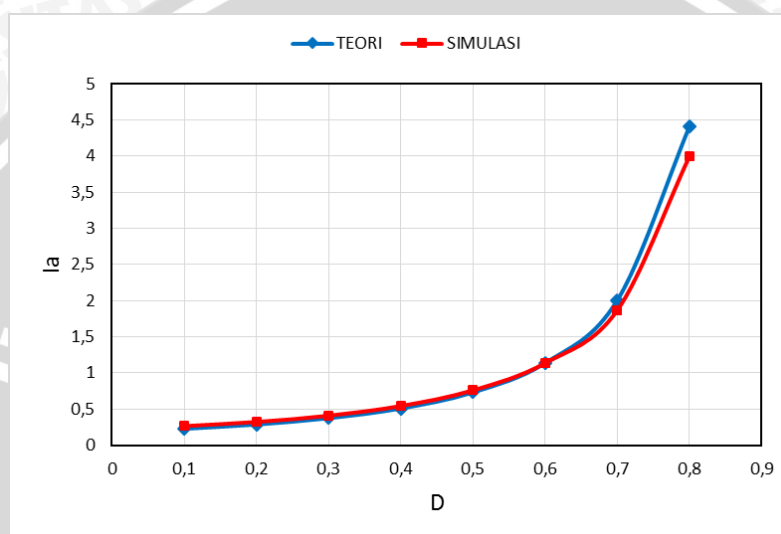
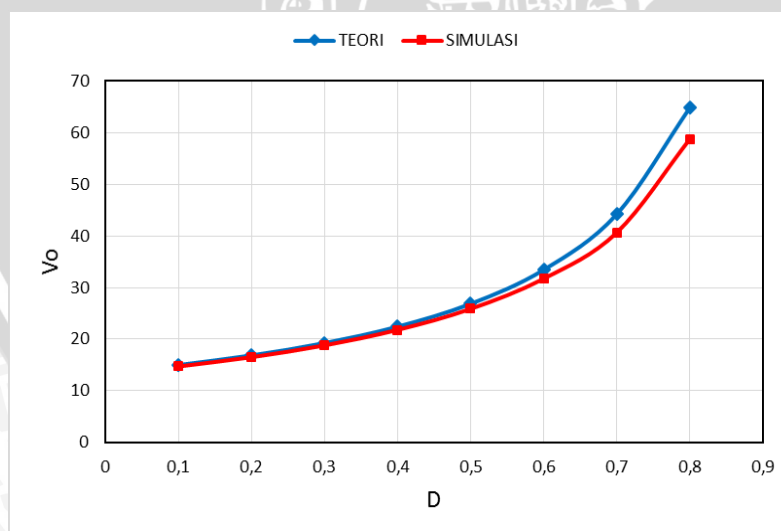
Gambar 4.18 (a) arus pada kapasitor DC-link. (b) arus pada resistor 60 ohm (c) tegangan pada resistor 60 ohm.

Gambar 4.16 menunjukkan urutan pensaklaran pada mode regeneratif. Gambar 4.17 menunjukkan bentuk tegangan terminal dan arus jangkar untuk mode pengereman regeneratif, sedangkan gambar 4.18 menunjukkan arus pada kapasitor DC-link, tegangan keluaran, dan arus keluaran RBS. Bentuk gelombang menunjukkan bahwa simulasi konverter sudah sesuai dengan teori pada Bab 2.

Tabel 4.6 menunjukkan data hasil simulasi dan data hasil perhitungan teori berdasarkan persamaan yang telah diturunkan pada Bab 2. Karakteristik arus jangkar ditunjukkan oleh gambar 4.19, sedangkan tegangan keluaran RBS ditunjukkan oleh gambar 4.20.

Tabel 4.6 Ia terhadap D mode regeneratif.

$V_{emf,L-L}$	I_a	D	V_o	I_o	I_a (Teori)	V_o (Teori)
10	0,2644	0,1	14,70	0,2450	0,227	14,99
10	0,3224	0,2	16,51	0,2751	0,287	16,85
10	0,4086	0,3	18,80	0,3133	0,374	19,24
10	0,5429	0,4	21,80	0,3633	0,509	22,42
10	0,7597	0,5	25,88	0,4313	0,731	26,85
10	1,1360	0,6	31,72	0,5287	1,138	33,44
10	1,8690	0,7	40,65	0,6775	2,007	44,24
10	4,0010	0,8	58,80	0,9800	4,415	64,88

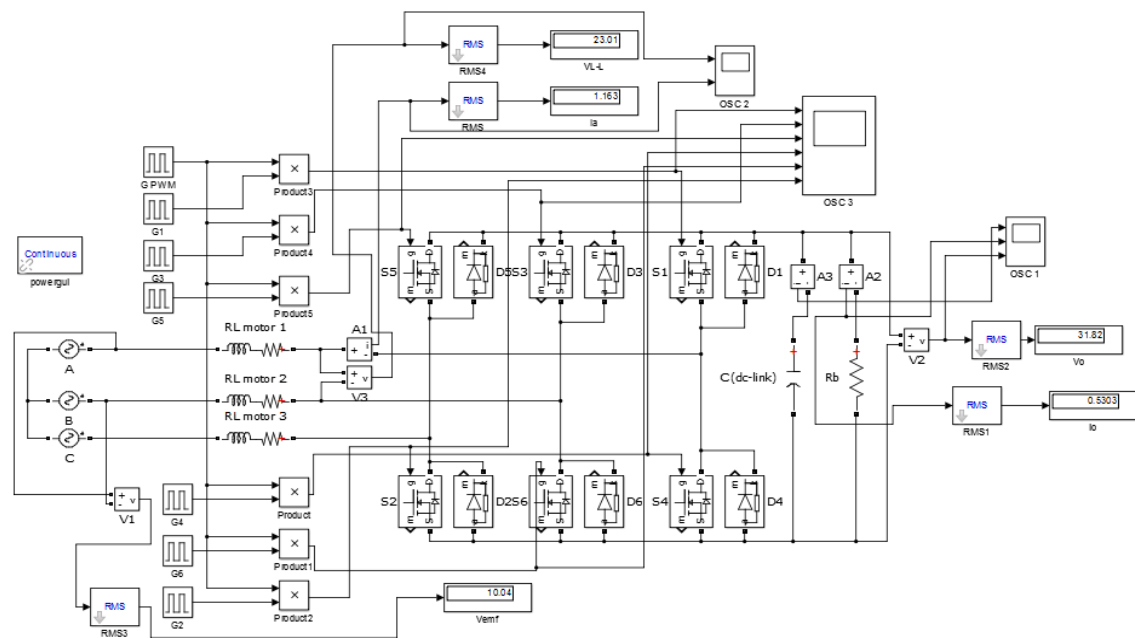
Gambar 4.19 Karakteristik I_a terhadap D, $V_{emf,L-L}=10V$, mode regeneratif.Gambar 4.20 Karakteristik V_o terhadap D, $V_{emf,L-L}=10V$, mode regeneratif.

Berdasarkan simulasi di atas maka dapat disimpulkan bahwa kenaikan *duty cycle* akan diikuti dengan kenaikan I_a dan V_o . Data hasil simulasi dan teori telah menunjukkan nilai yang sesuai. Namun demikian, masih terjadi penyimpangan antara perhitungan teori dan

simulasi. Hal ini dikarenakan adanya rugi konduksi dari R_{ds} pada tiap MOSFET sehingga menyebabkan adanya jatuh tegangan tiap – tiap komponen MOSFET yang digunakan. Selisih arus jangkar terbesar antara teori dan simulasi adalah sebesar 0,414A pada *duty cycle* 0,8. Selisih tegangan keluaran antara teori dan simulasi adalah sebesar 6,08V pada *duty cycle* 0,8.

4.4.2.2 Mode pengereman Regeneratif-plugging.

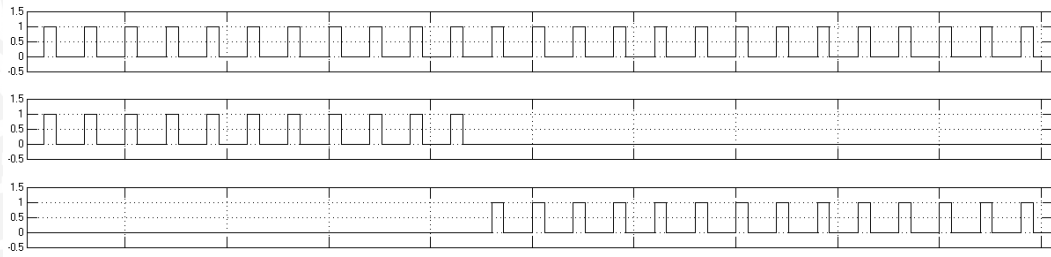
Pada simulasi ini inverter akan dioperasikan pada mode Regeneratif-plugging. *Duty cycle* akan dibuat bervariasi mulai dari 0,1 sampai dengan 0,4. $V_{emf,L-L}$ yang diberikan adalah sebesar 10V, dan $R=60\ \Omega$ dipasang pada sisi tegangan DC. I_a , V_o , dan I_o dicatat kemudian dibandingkan dengan perhitungan teori. Gambar 4.21 menunjukkan rangkaian simulasi menggunakan Simulink MATLAB.



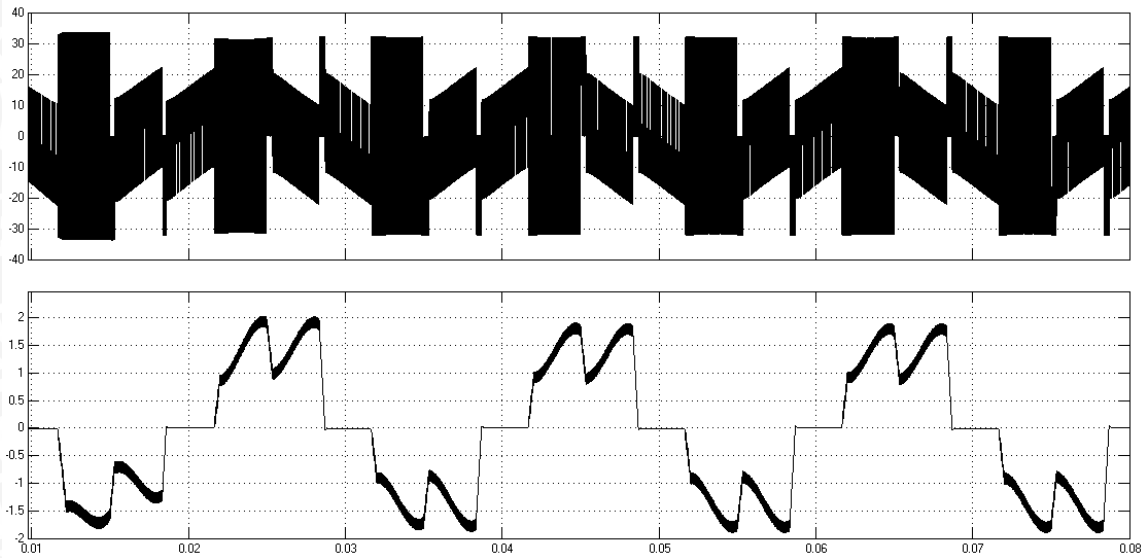
Gambar 4.21 Rangkaian simulasi VSI dalam mode Regeneratif-plugging menggunakan Matlab.



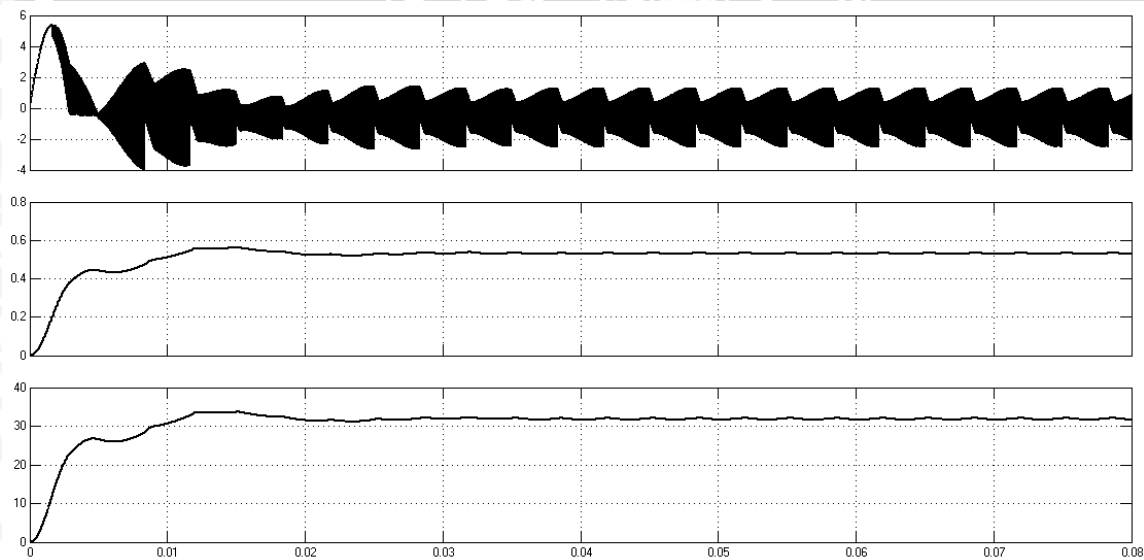
Gambar 4.22 Urutan pensaklaran S1, S3, S5, S4, S6, S2 pada mode regeneratif-plugging.



Gambar 4.23 Proses peralihan pensaklaran dari S5-S4 menjadi S5-S6.



Gambar 4.24 Bentuk arus jangkar fasa A dutycycle 30%, $V_{emf,L-L}=10V$.



Gambar 4.25 (a) arus kapasitor, (b) arus masuk baterai (I_o), (c) Tegangan terminal baterai (V_o).

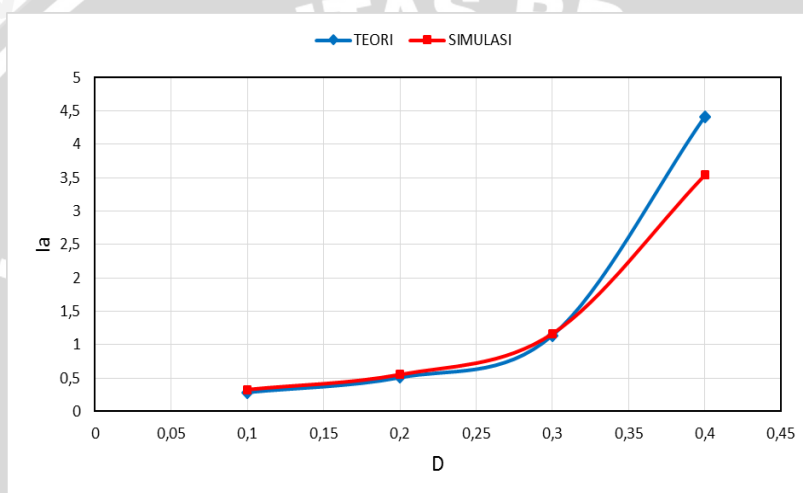
Gambar 4.22 dan 4.23 menunjukkan urutan pensaklaran pada mode regeneratif-*plugging*. Gambar 4.24 menunjukkan bentuk tegangan terminal dan arus jangkar untuk mode pengereman regeneratif, sedangkan gambar 4.25 menunjukkan arus pada kapasitor DC-link, tegangan keluaran, dan arus keluaran RBS. Bentuk gelombang menunjukkan bahwa simulasi

konverter sudah sesuai dengan teori pada Bab 2.

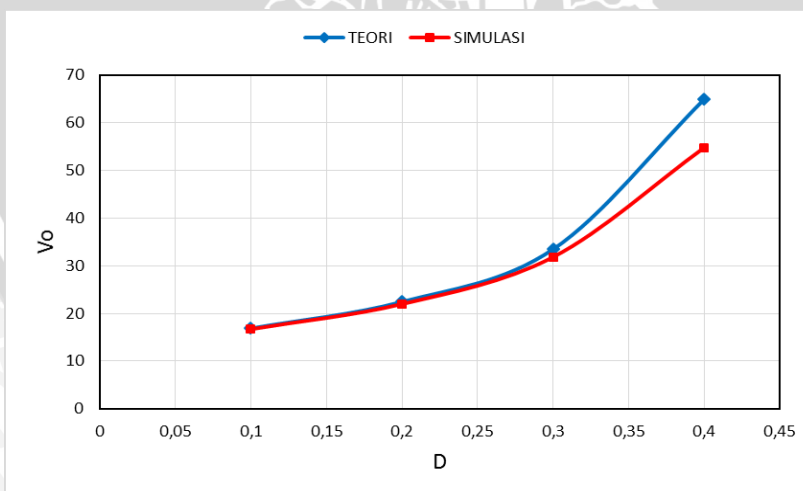
Tabel 4.7 menunjukkan data hasil simulasi dan data hasil perhitungan teori. Karakteristik arus jangkar ditunjukkan oleh gambar 4.26, sedangkan tegangan keluaran RBS ditunjukkan oleh gambar 4.27.

Tabel 4.7 Ia terhadap D mode Regeneratif-plugging.

$V_{emf,L-L}$	I_a	D	V_o	I_o	I_a (Teori)	V_o (Teori)
10	0,327	0,1	16,69	0,278	0,287	16,85
10	0,552	0,2	21,97	0,366	0,509	22,42
10	1,163	0,3	31,82	0,530	1,138	33,44
10	3,537	0,4	54,76	0,913	4,415	64,88



Gambar 4.26 Karakteristik I_a terhadap D, $V_{emf,L-L}=10V$, mode Regeneratif-plugging.



Gambar 4.27 Karakteristik V_o terhadap D, $V_{emf,L-L}=10V$, Regeneratif-plugging.

Berdasarkan simulasi di atas dapat disimpulkan bahwa kenaikan *duty cycle* akan diikuti dengan kenaikan I_a dan V_o . Data hasil simulasi dan teori telah menunjukkan nilai yang sesuai. Namun demikian, masih terjadi penyimpangan antara perhitungan teori dan

simulasi. Hal ini dikarenakan adanya rugi konduksi dari R_{ds} pada tiap MOSFET sehingga menyebabkan adanya jatuh tegangan tiap – tiap komponen MOSFET yang digunakan. Selisih arus jangkar terbesar antara teori dan simulasi adalah sebesar 0,878 A pada *duty cycle* 0,4. Selisih tegangan keluaran antara teori dan simulasi adalah sebesar 10,12 V pada *duty cycle* 0,4.



BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

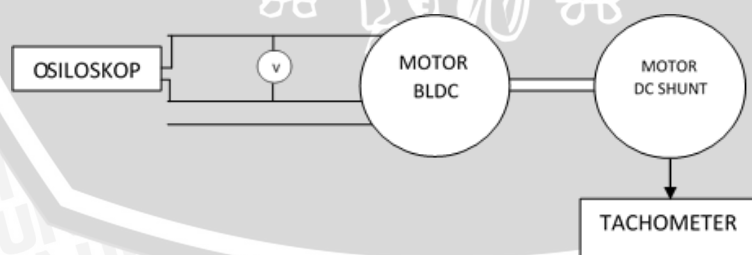
Pengujian dan analisis dilakukan untuk mengetahui kerja sistem sesuai perancangan yang telah dilakukan. Pengujian dilakukan per blok sistem kemudian secara keseluruhan. Adapun pengujian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Pengujian *Back EMF* motor BLDC.
2. Pengujian sensor arus.
3. Pengujian parameter motor BLDC
4. Pengujian sensor efek medan (*Hall sensors*) pada motor BLDC.
5. Pengujian sinyal picu dari Mikrokontroler.
6. Pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran RBS.
7. Pengujian RBS secara *open loop*.
8. Pengujian RBS secara *close loop*.
9. Pengujian regenerasi energi.

5.1 Pengujian *Back EMF* motor BLDC

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui persamaan *Back EMF* terhadap kecepatan. Kemudian fungsi ini digunakan untuk melakukan perhitungan secara teori dan juga simulasi. Perhitungan secara teori dan simulasi bertujuan untuk memeriksa kinerja dari sistem, apakah sudah sesuai dengan yang diharapkan. Selain itu, konstanta elektrik yang didapatkan pada pengujian ini akan digunakan untuk mengetahui persamaan torsi terhadap arus jangkar motor.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian adalah 1 (satu) buah voltmeter digital, osiloskop digital, tachometer, motor DC *shunt*, dan motor BLDC. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Rangkaian pengujian *Back-EMF* motor BLDC.

Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar motor BLDC pada kecepatan tertentu, kemudian mencatat tegangan keluaran pada terminal motor ($V_{emf,L-L}$), dan frekuensi elektrik dari gelombang tegangan yang dihasilkan. Data hasil pengukuran yakni kecepatan rotor, frekuensi, $V_{emf,L-L}$, dicatat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5.1 Pengujian *Back*-EMF motor BLDC

Kecepatan rotor (rpm)	Kecepatan linier (km/jam)	Frekuensi (Hz)	$V_{emf,L-L}$ (volt)	$V_{emf,L-N}$ (volt)	Konstanta elektrik (Ke) ($V_{emf, L-L}/rpm$)
109,47	10,52	50,85	5,45	3,15	0,05
130,00	12,50	61,61	6,55	3,78	0,05
153,95	14,80	71,10	7,75	4,47	0,05
174,47	16,77	81,38	8,73	5,04	0,05
200,13	19,24	90,25	9,95	5,74	0,05
215,53	20,72	100,00	10,88	6,28	0,05
239,47	23,02	111,60	11,92	6,88	0,05
266,16	25,59	121,00	13,26	7,66	0,05
283,26	27,23	131,00	14,10	8,14	0,05
306,53	29,47	142,00	15,26	8,81	0,05
324,32	31,18	151,00	16,15	9,32	0,05
349,63	33,61	161,00	17,32	10,00	0,05
368,79	35,45	171,00	18,39	10,62	0,05
431,74	41,50	200,00	21,40	12,36	0,05

Mengingat BLDC adalah motor magnet permanen, maka besarnya *Back*-EMF hanya akan dipengaruhi oleh kecepatan rotor. *Back*-EMF dan kecepatan rotor dihubungkan oleh suatu konstanta elektrik dalam suatu persamaan. Konstanta elektrik didapatkan dengan cara membagi $V_{emf,L-L}$ dengan kecepatan rotor (dalam rpm). Didapatkan bahwa konstanta elektrik bernilai konstan, yaitu 0,05. Dengan demikian didapatkan persamaan $V_{emf,L-L}$ terhadap putaran rotor seperti ditunjukkan oleh persamaan 5-1.

$$V_{emf,L-L} = 0,05 \cdot n_r \quad (5-1)$$

kecepatan linier dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$v = 0,0006 \cdot \pi \cdot n_r \cdot D \quad (5-2)$$

dengan:

$$V_{emf,L-L} = \text{Back-EMF motor (volt)}$$

$$n_r = \text{kecepatan rotor (rpm)}$$

$$v = \text{kecepatan linier}$$

$$D = \text{Diameter luar roda sepeda (cm)} = 51 \text{ cm}$$

hubungan antara $V_{rms,L-L}$ dan kecepatan linier dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{emf,L-L} = \frac{250}{3\pi \cdot D} \times v \quad (5-3)$$

Persamaan terhadap torsi elektromagnetik terhadap arus jangkar dapat diturunkan sebagai berikut:

$$T_{em} = \frac{\sqrt{3} V_{emf,L-L} \cdot I_a}{\omega_r} = \frac{\sqrt{3} (0,05) n_r \cdot I_a}{2\pi \frac{n_r}{60}}$$

Dengan demikian didapatkan persamaan torsi sebagai fungsi arus jangkar:

$$T_{em} = 0,827I_a \quad (5-4)$$

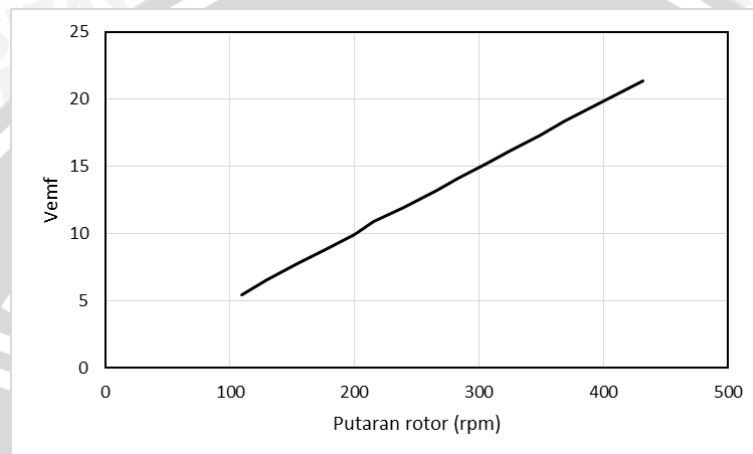
dengan:

I_a = Arus jangkar motor.

T_{em} = Torsi elektromagnetik motor.

Kurva karakteristik *Back-EMF* terhadap putaran motor ditunjukkan pada gambar 5.2.

Terlihat bahwa $V_{emf,L-L}$ naik secara linier seiring kenaikan putaran.



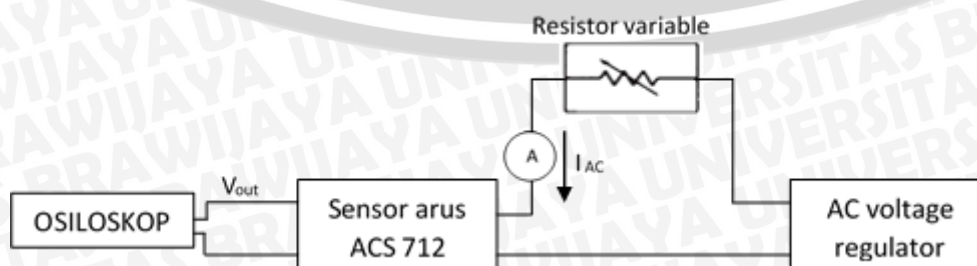
Gambar 5.2 Karakteristik *Back EMF* terhadap putaran motor (dalam rpm)

5.2 Pengujian sensor arus

Sensor arus yang digunakan pada sistem ini adalah ACS712-20A. Pengujian sensor arus bertujuan untuk mengetahui sensitifitas sensor untuk pembacaan puncak arus AC.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini antara lain adalah osiloskop, sensor arus ACS712, Resistor variabel, amperemeter, sumber tegangan AC variabel. Konfigurasi rangkaian percobaan dapat dilihat pada gambar 5.3.

Pengujian dilakukan dengan cara mengalirkan arus AC melewati sensor arus dengan beberapa variasi nilai rms tertentu, kemudian tegangan puncak keluaran sensor diamati melalui osiloskop dan dicatat. Tabel 5.2 merupakan data hasil pengujian sensor dengan arus AC mulai arus 0 hingga 6 ampere.



Gambar 5.3 Rangkaian pengujian sensor arus.

Tabel 5.2 Data pengujian sensor arus.

No.	Arus (rms)	Arus (peak)	Tegangan keluaran sensor (volt)				sensitivitas
			V _{max}	V _{rms}	V _{min}	V _{mean}	
1	0	0	2,56	2,52	2,52	2,52	-
2	1,021	1,444	2,72	2,52	2,40	2,52	0,160
3	2,019	2,855	2,88	2,52	2,24	2,52	0,160
4	3,038	4,296	2,96	2,56	2,12	2,52	0,130
5	4,050	5,728	3,12	2,56	1,96	2,52	0,140
6	5,040	7,128	3,24	2,56	1,84	2,52	0,130
7	6,170	8,726	3,40	2,60	1,68	2,52	0,140
					Rata-rata		0,143

Karena proses pembacaan arus pada mikrokontroler dilakukan dengan cara mendeteksi nilai puncak ($V_{\max}$) dari tegangan keluaran sensor, maka melalui data pada tabel 5.2 dapat diturunkan persamaan yang menghubungkan antara $V_{\max}$ sensor terhadap I_{rms} . Sensitivitas sensor untuk arus AC dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{\max(i)} = K_a(i) \cdot I_{\text{rms}(i)} + 2,56$$

$$K_a(i) = \frac{V_{\max(i)} - 2,56}{I_{\text{rms}(i)}} \quad (5-5)$$

dimana:

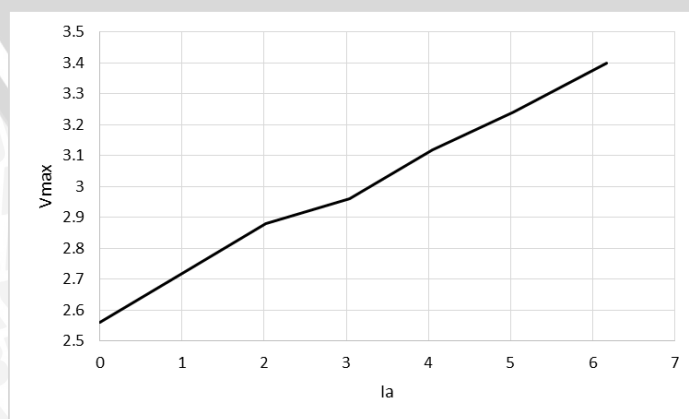
$V_{\max(i)}$ = tegangan puncak sensor pada data ke-i (V).

$I_{\text{rms}(i)}$ = arus rms sensor pada data ke-i (A).

$K_a(i)$ = sensitifitas sensor arus

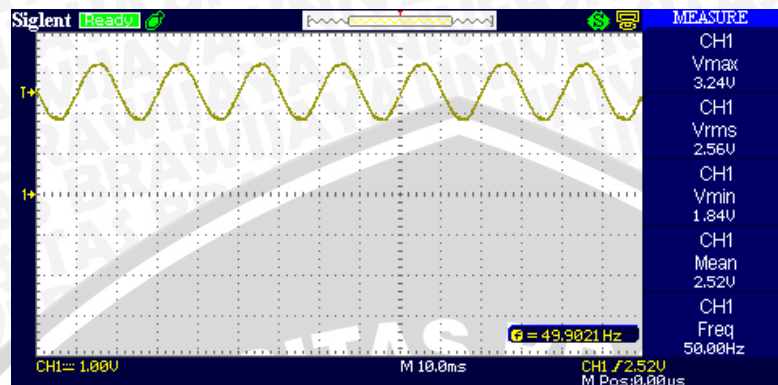
2,56 adalah nilai $V_{\max}$ saat arus masukan 0 A.

Karena konstanta tegangan keluaran sensor tidak terlalu bervariasi, maka diambil K_a rata-rata sebesar 0,143. Dengan demikian ketelitian pembacaan sensor arus adalah sebesar 143 mV/ampere.



Gambar 5.4 Karakteristik tegangan puncak keluaran sensor arus terhadap besar arus AC

Gambar 5.4 menunjukkan karakteristik $V_{\max}$ sensor terhadap besar arus masukan sensor. Kenaikan $V_{\max}$ sensor cenderung memiliki gradien yang konstan, namun untuk arus 2 hingga 3 ampere gradien kenaikan sedikit menurun.



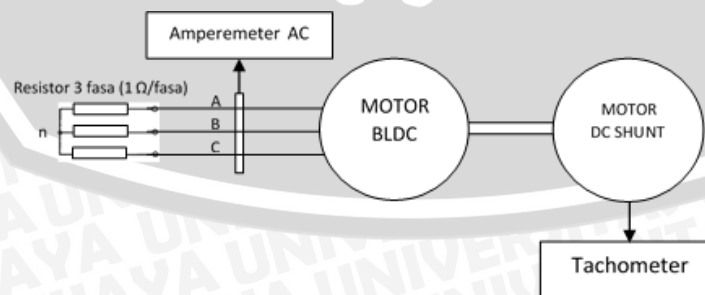
Gambar 5.5 Tegangan keluaran sensor arus, untuk arus efektif 5.04 A

Gambar 5.5 menunjukkan bentuk tegangan keluaran sensor arus ACS712 ketika ditampilkan di osiloskop. Terlihat bahwa bentuk tegangan keluaran sensor sesuai dengan bentuk arus masukan sensor (arus AC). Untuk arus AC siklus positif, maka tegangan keluaran akan lebih besar dari 2,5 V dan untuk siklus negatif arus AC, maka tegangan keluaran akan lebih rendah dari 2,5 V.

5.3 Pengujian parameter motor BLDC

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui parameter motor BLDC, yaitu R_a , dan L. Parameter motor digunakan untuk melakukan simulasi dan penentuan spesifikasi komponen pada perancangan alat.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah motor BLDC, motor DC *shunt*, Amperemeter AC, 3 buah resistor 1 Ω dihubungkan Y. Konfigurasi rangkaian percobaan dapat dilihat pada gambar 5.6.



Gambar 5.6 Rangkaian pengujian parameter motor BLDC.

Nilai resistansi jangkar (R_a) dapat diukur dengan mudah dengan menghubungkan *probe* ohmmeter pada terminal motor BLDC. Resistansi jangkar yang didapatkan dari hasil

pengukuran adalah sebesar 0,1 ohm. Oleh karena motor BLDC memiliki belitan jangkar yang terhubung Y (wye), maka $R_a = 0,1/2 = 0,05$ ohm/fasa.

Pengujian untuk menentukan induktansi motor dilakukan dengan cara memutar motor BLDC pada beberapa variasi putaran (dioperasikan sebagai generator), kemudian mencatat arus fasa motor yang mengalir melalui hambatan 1 ohm seimbang yang terhubung Y (wye). Melalui persamaan-persamaan yang telah diturunkan pada Bab II, dapat dihitung besar induktansi motor. Tabel 5.3 menunjukkan hasil pengukuran kecepatan, arus jangkar, dan perhitungan induktansi motor.

$$V_{emf,L-L} = 0,05 \cdot n_r \text{ (persamaan 2-2)}$$

$$Z = \frac{V_{emf,L-L}}{\sqrt{3}I_a} \text{ (persamaan 2-3)}$$

$$X_s = \sqrt{Z^2 - (1 + R_a)^2} \text{ (persamaan 2-4)}$$

$$L = \frac{X_s}{2\pi f_e} \text{ (persamaan 2-5)}$$

dengan:

I_a = Arus jangkar.

Z = Impedansi total sistem.

X_s = reaktansi jangkar.

R_a = Resistansi jangkar.

L = Induktansi motor.

f_e = Frekuensi gelombang elektrik.

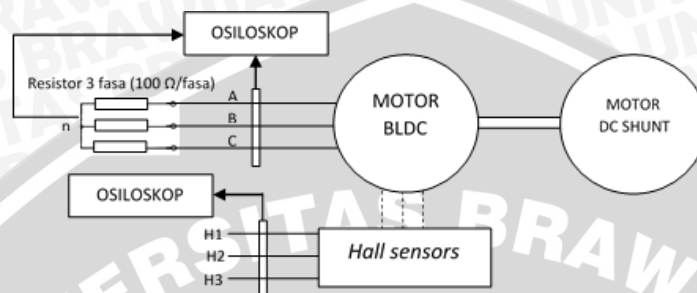
Tabel 5. 3 Pengujian parameter motor BLDC

Kecepatan rotor BLDC (rpm)	Frekuensi (Hz)	$V_{emf,L-L}$ (V)	I_a (A)	Z (Ω)	X_s (Ω)	L (μ H)
126,58	59,07	6,33	2,96	1,23447	0,64916	1749,05
153,95	71,84	7,70	3,52	1,26252	0,70104	1553,05
171,05	79,82	8,55	3,80	1,29944	0,76553	1526,32
195,00	91,00	9,75	4,26	1,32140	0,80225	1403,09

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan bahwa besar induktansi motor menurun seiring bertambahnya arus jangkar. Induktansi terkecil bernilai 1408,86 μ H, sehingga nilai ini digunakan sebagai acuan dalam menghitung spesifikasi komponen. Untuk mempermudah dalam melakukan perhitungan maka nilai induktansi motor yang menjadi acuan dalam perancangan alat dibulatkan menjadi 1400 μ H.

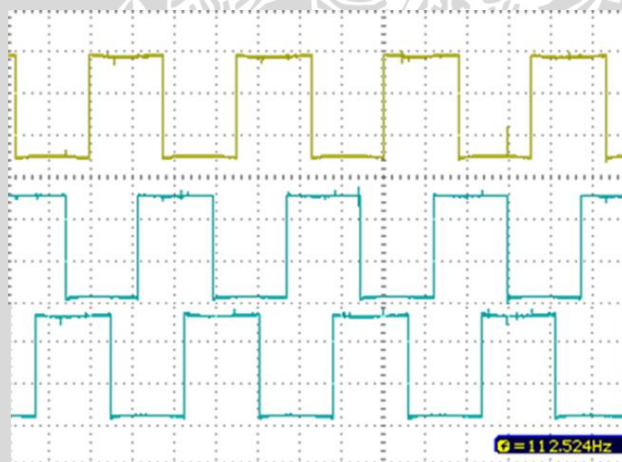
5.4 Pengujian sensor efek medan (*Hall Sensors*) pada motor BLDC

Pengujian sensor efek medan bertujuan untuk memeriksa urutan kombinasi sensor efek medan dan mengetahui beda fasa antara sensor efek medan dan *Back-EMF*. Peralatan yang digunakan untuk pengujian ini antara lain motor BLDC, Motor DC *shunt*, osiloskop, 3 buah resistor 1 Ω dihubungkan Y. Konfigurasi rangkaian percobaan dapat dilihat pada gambar 5.7.



Gambar 5.7 Rangkaian pengujian *Hall sensors*.

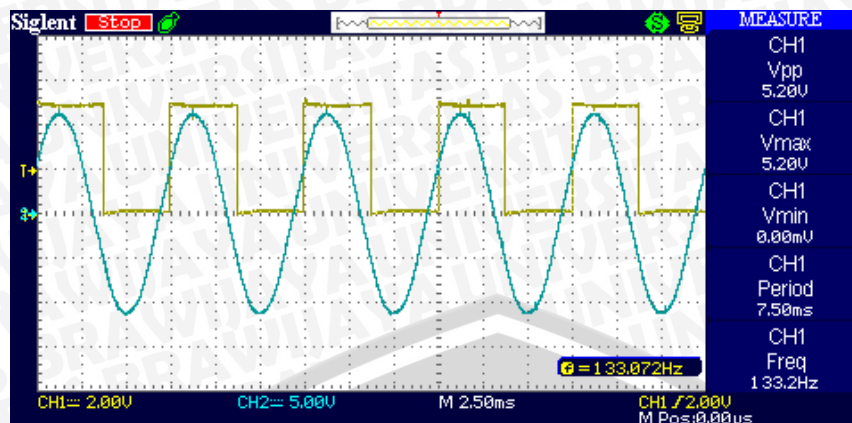
Pengujian pertama dilakukan dengan cara memutar motor BLDC dengan menggunakan motor DC *shunt*, kemudian mengamati bentuk sinyal keluaran *Hall sensors* melalui osiloskop.



Gambar 5.8 Sinyal keluaran sensor efek medan 1,2 dan 3.

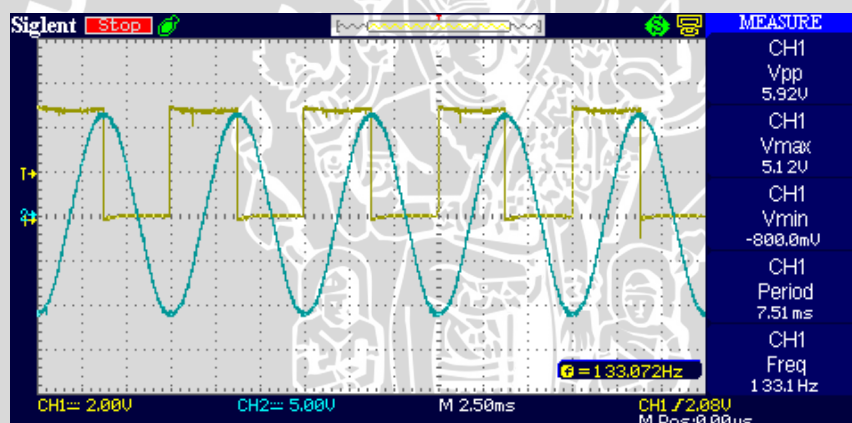
Gambar 5.8 menunjukkan sinyal keluaran *Hall sensors* 1, 2 dan 3. Terlihat bahwa *Hall* 1, *Hall* 2, dan *Hall* 3 berbeda fasa sebesar 120° listrik. Ketiga *Hall sensors* membentuk 6 kombinasi berbeda mulai 101, 100, 110, 010, 011, 001. Urutan kombinasi *Hall sensors* telah sesuai dengan tabel pensaklaran yang akan diterapkan.

Pengujian kedua dilakukan dengan cara memutar motor BLDC dengan motor menggunakan DC *shunt*, kemudian mengamati bentuk sinyal keluaran *Hall sensors*, V_{L-L} dan V_{L-N} melalui osiloskop.



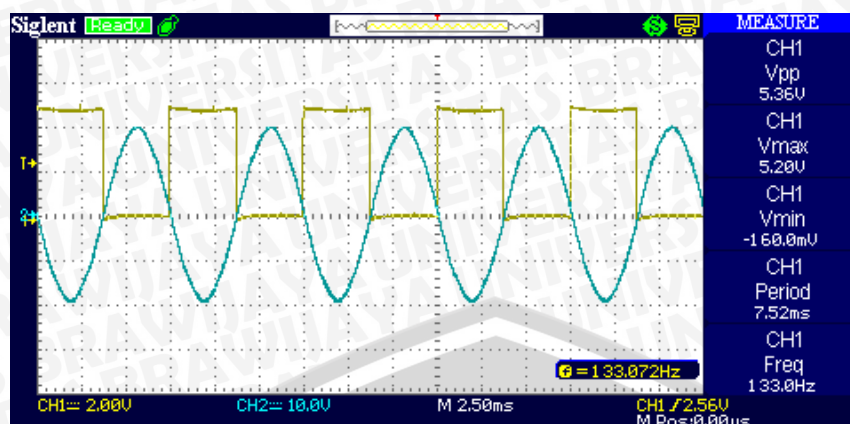
Gambar 5.9 Gelombang V_{An} (biru) dan sinyal *Hall sensor* 1 (kuning).

Gambar 5.9 menunjukkan beda sudut fasa antara sinyal *Hall sensor* 1 dan gelombang V_{An} . Terlihat bahwa *Hall sensor* 1 tertinggal sejauh 30° listrik terhadap gelombang V_{An} . Pada pengujian ini sinyal *Hall sensors* 2 dan *Hall sensors* 3 berturut-turut juga tertinggal sejauh 30° terhadap gelombang tegangan V_{Bn} dan V_{Cn} . Gelombang hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran 5.



Gambar 5.10 Gelombang V_{Bn} dan sinyal *Hall sensor* 1.

Jika V_{An} adalah referensi (sudut fasa nol), maka sudut fasa *Hall sensor* 1 adalah -30° (tanda minus menyatakan tertinggal), sedangkan sudut fasa V_{Bn} adalah -120° . Kondisi ini akan menyebabkan sudut fasa V_{Bn} tertinggal sejauh 90° terhadap *Hall sensor* 1. Pada gambar 5.10 terlihat bahwa ketika sinyal *Hall sensor* 1 tepi turun, maka V_{Bn} akan berada di puncak. Dengan kata lain V_{Bn} tertinggal sejauh 90° terhadap *Hall sensor* 1.



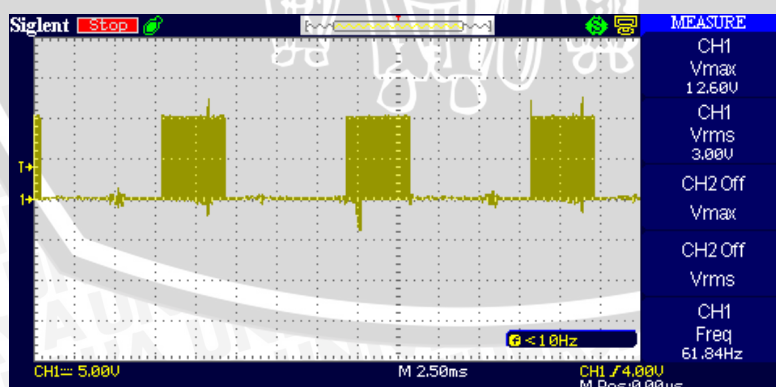
Gambar 5.11 Bentuk gelombang V_{AB} (biru) dan sinyal keluaran *Hall sensor 2*.

Jika V_{An} adalah referensi (sudut fasa nol), maka sudut fasa V_{AB} adalah $+30^\circ$ (tanda positif menyatakan mendahului), sudut fasa *Hall sensor 1* adalah -30° , dan sudut fasa *Hall sensor 2* adalah -150° . Kondisi ini akan menyebabkan sudut fasa V_{AB} mendahului sejauh 180° terhadap *Hall sensor 2*. Pada gambar 5.11 terlihat bahwa V_{AB} mendahului sejauh 180° terhadap *Hall sensor 2*.

Berdasarkan pengujian-pengujian di atas dapat disimpulkan bahwa beda sudut fasa antara *Hall sensors* dan *Back EMF* telah sesuai dengan tabel pensaklaran yang direncanakan.

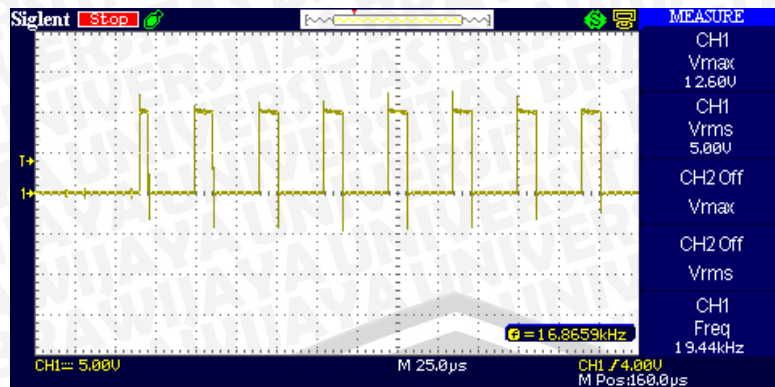
5.5 Pengujian sinyal picu Mikrokontroler

Pengujian ini bertujuan untuk memeriksa frekuensi dan urutan sinyal pensaklaran mikrokontroler apakah telah sesuai dengan yang direncanakan. Pengujian dilakukan dengan cara memutar motor BLDC dengan kecepatan tertentu. *Hall sensors* diumpanbalikkan ke Mikrokontroler yang telah di-*upload* program. Sinyal picu dari mikrokontroler ditampilkan melalui osiloskop.



Gambar 5.12 Sinyal pensaklaran LO 1 dengan frekuensi 61,8 Hz.

Gambar 5.12 menunjukkan sinyal picu keluaran MOSFET *Gate Driver* (MGD) untuk S4 pada putaran rotor 132,4 rpm.

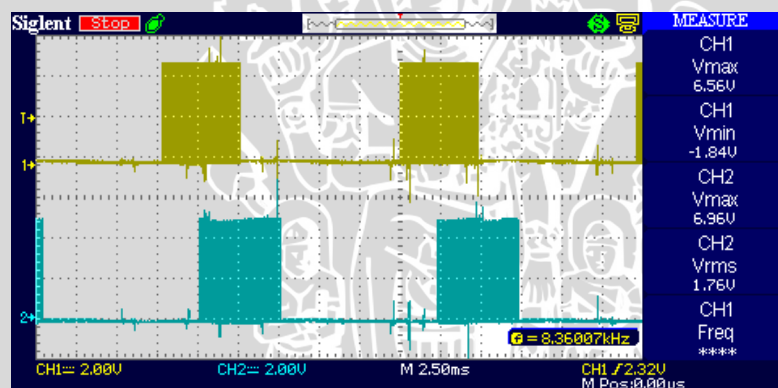


Gambar 5.13 Sinyal PWM keluaran MGD

Gambar 5.13 menunjukkan bahwa periode sinyal picu MGD adalah sebesar 1,6 Div. Karena *setting* sumbu horisontal osiloskop sebesar 25 μs/div, maka frekuensi pensaklaran dapat dihitung sebagai berikut:

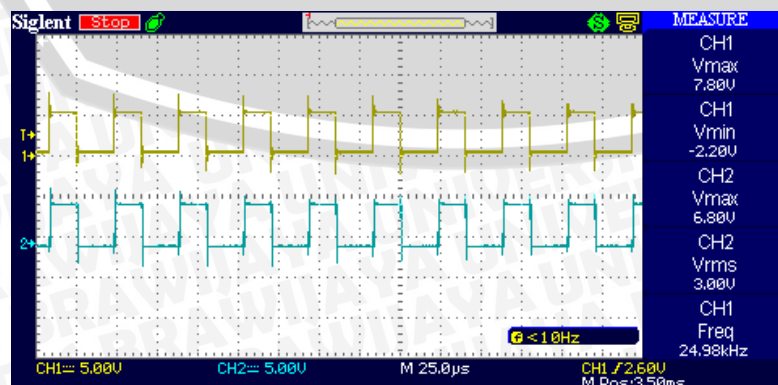
$$f_{sw} = \frac{1}{1,6 \times 25 \times 10^{-6}} = 25.000 \text{ Hz}$$

Dapat disimpulkan bahwa frekuensi pensaklaran MOSFET telah sesuai dengan yang direncanakan.



Gambar 5.14 Urutan sinyal picu S1 dan S2 pada mode Regeneratif-plugging.

Gambar 5.14 menunjukkan urutan pensaklaran (S1 dan S2 saja) untuk mode regeneratif-plugging. Untuk sinyal pensaklaran yang lain ditunjukkan pada lampiran 5.



Gambar 5.15 PWM S1 dan S6 pada mode regeneratif-plugging

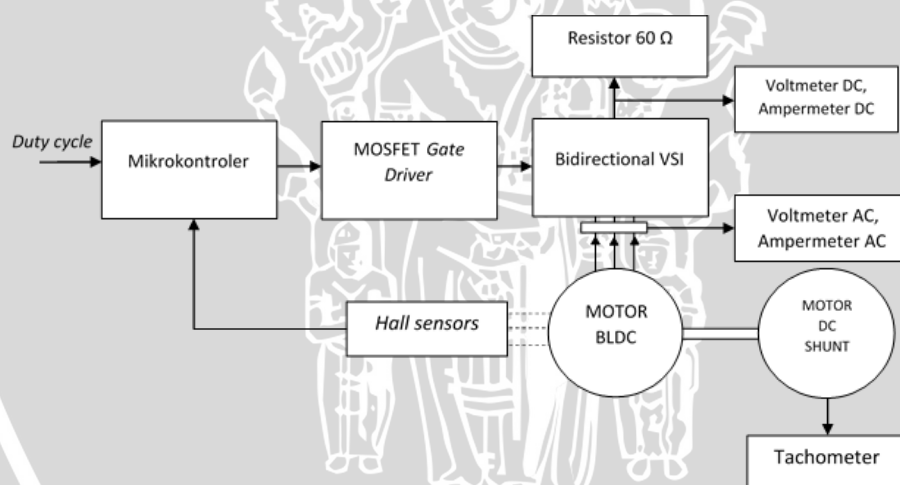
Pada mode regeneratif-*plugging* saklar kelompok ganjil dan genap yang dioperasikan pada mode PWM harus padam dan konduksi secara bersamaan. Gambar 5.15 menunjukkan gelombang pensaklaran S1 dan S6. Terlihat bahwa S1 dan S6 akan konduksi dan padam secara bersamaan pada *state* IV (*Hall sensors* = 010).

Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa program untuk menentukan urutan sinyal picu MOSFET telah bekerja dengan sebagaimana mestinya.

5.6 Pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran RBS

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kerja RBS. Karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran (tegangan *charging*) dibandingkan secara teori, simulasi, dan pengujian untuk mengetahui apakah sistem sudah berjalan sesuai dengan yang direncanakan.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Bidirectional* VSI beserta unit kontrol, motor BLDC, motor DC *shunt*, resistor 60 Ω , Voltmeter dan Amperemeter DC, Voltmeter dan Amperemeter AC, Tachometer. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar 5.16.



Gambar 5.16 Rangkaian pengujian karakteristik arus pengereman dan tegangan keluaran.

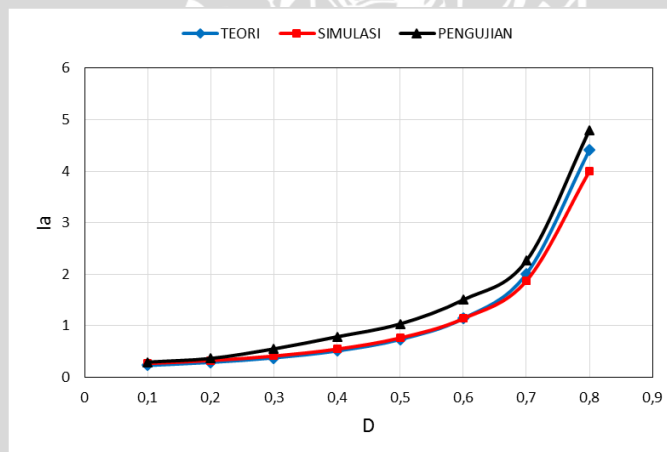
Pengujian dilakukan dengan memasang resistor tetap 60 Ω pada sisi DC VSI. Putaran motor dipertahankan konstan sebesar 200 rpm ($V_{emf,L-L}=10V$), dan *duty cycle* dibuat bervariasi mulai dari 10% hingga 80%. Tegangan terminal motor, arus jangkar, tegangan keluaran dan arus keluaran RBS dicatat. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah untuk melihat karakteristik masing-masing mode pengereman. Tabel 5.4 menunjukkan hasil pengujian RBS pada mode regeneratif, dan Tabel 5.5 menunjukkan hasil pengujian RBS dalam mode regeneratif-*plugging*.

Tabel 5.4 Pengujian RBS dengan beban $R=60\ \Omega$, mode regeneratif.

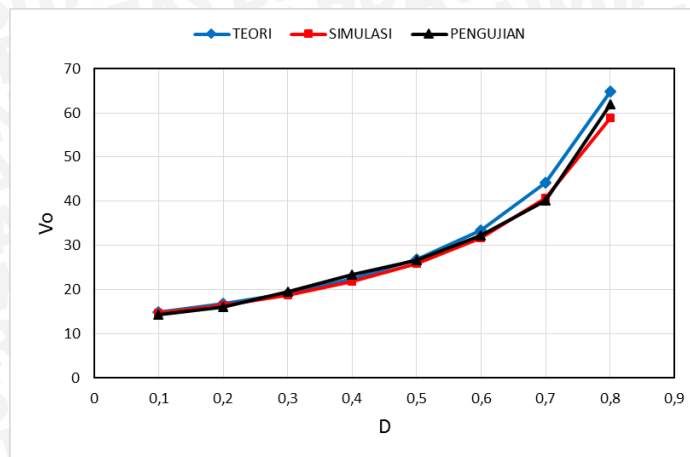
$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)
10	10,20	0,291	0,1	14,3	0,239
10	10,03	0,363	0,2	16,0	0,266
10	10,65	0,547	0,3	19,6	0,325
10	11,25	0,783	0,4	23,3	0,387
10	11,53	1,033	0,5	26,6	0,444
10	12,19	1,500	0,6	32,3	0,535
10	12,37	2,260	0,7	40,1	0,667
10	12,70	4,800	0,8	62,0	0,987

Tabel 5.5 Pengujian RBS dengan beban $R=60\ \Omega$ mode regeneratif-plugging.

$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)
10	10,18	0,440	0,1	16,3	0,268
10	12,22	0,823	0,2	23,8	0,390
10	15,86	1,340	0,3	32,1	0,535
10	17,52	3,600	0,4	54,2	0,896

Gambar 5.17 Karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif, beban resistor 60Ω .

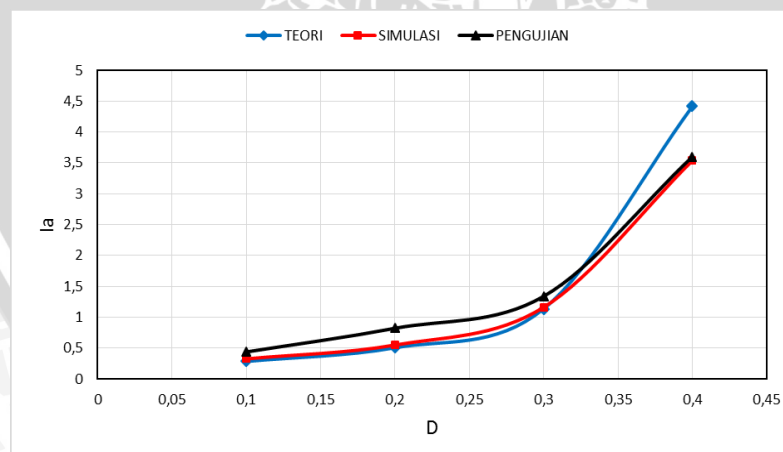
Pada gambar 5.17 terlihat bahwa arus jangkar pada teori, simulasi dan pengujian naik dengan pola yang sama, namun arus pada pengujian terlihat lebih tinggi dari teori, dan simulasi. Hal ini disebabkan karena THD yang lebih tinggi saat pengujian sebenarnya menyebabkan nilai RMS total arus mengalami kenaikan. Penyimpangan terbesar antara teori dan pengujian adalah sebesar 0,606 A, pada *duty cycle* 0,8.



Gambar 5.18 Karakteristik tegangan keluaran DC (V_o) terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif, beban resistor 60Ω .

Pada gambar 5.18 Terlihat bahwa tegangan keluaran RBS (V_o) secara teori, simulasi dan pengujian telah menunjukkan nilai yang sesuai. Namun, untuk *duty cycle* 0,7 dan 0,8, nilai hasil pengujian dan simulasi sedikit lebih rendah dibandingkan nilai perhitungan teori, hal ini disebabkan karena adanya jatuh tegangan pada konverter akibat nilai arus yang semakin tinggi. Penyimpangan antara teori dan pengujian terbesar terjadi pada *duty cycle* 0,7 yaitu sebesar 4,14 V.

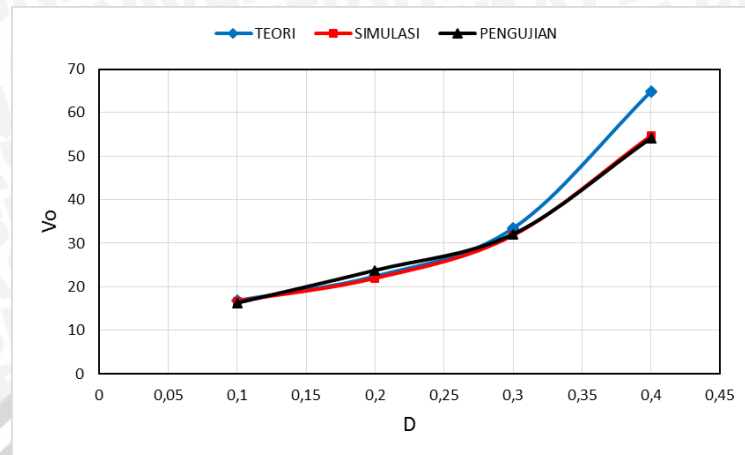
Berdasarkan kurva karakteristik arus jangkar dan tegangan keluaran RBS, dapat disimpulkan bahwa RBS pada mode regeneratif sudah bekerja sesuai dengan yang direncanakan.



Gambar 5.19 Karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif-plugging, beban resistor 60Ω .

Gambar 5.19 menunjukkan bahwa arus jangkar pada teori, simulasi dan pengujian akan naik seiring bertambahnya *duty cycle*. Namun terjadi penyimpangan pada nilai arus jangkar pada pengujian jika dibandingkan dengan simulasi dan perhitungan teori.

Penyimpangan terbesar antara teori dan pengujian terjadi pada *duty cycle* 0,4 yaitu sebesar 0,81 A.

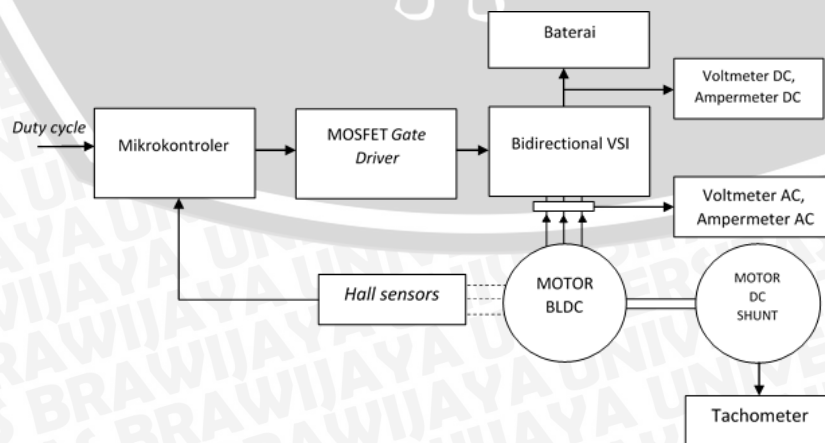


Gambar 5.20 Karakteristik tegangan keluaran DC (V_o) terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif-plugging, beban resistor 60 Ω .

Pada gambar 5.20 tampak bahwa tegangan keluaran DC antara simulasi dan pengujian telah menunjukkan nilai yang sesuai. Namun nilai V_o secara pengujian dan simulasi terlihat lebih rendah dari nilai V_o secara teori pada *duty cycle* 0,4. Hal ini disebabkan karena adanya jatuh tegangan pada konverter akibat arus yang semakin tinggi. Selisih terbesar antara teori dan pengujian terjadi pada *duty cycle* 0,4 yaitu sebesar 10,67 V.

5.7 Pengujian RBS secara *open loop*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik arus jangkar (I_a) terhadap *duty cycle* saat RBS dibebani baterai 48V. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Bidirectional VSI* beserta unit kontrol, motor BLDC, motor DC shunt, Baterai 48V, Voltmeter dan Amperemeter DC, Voltmeter dan Amperemeter AC, Tachometer. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar 5.21.



Gambar 5.21 Rangkaian pengujian RBS secara *open loop*.

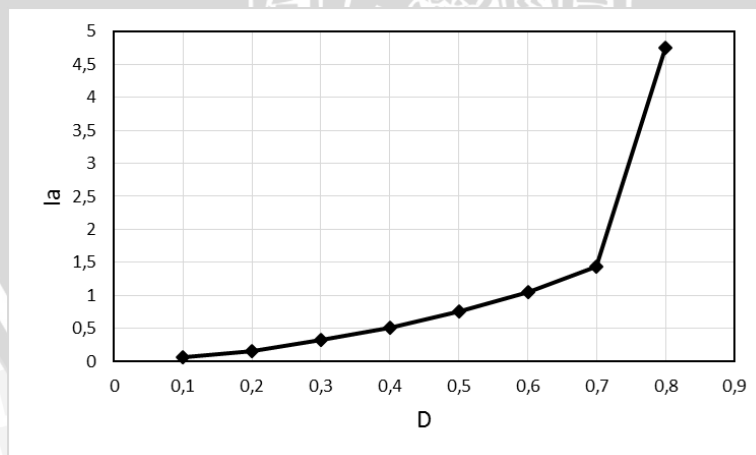
Pengujian dilakukan dengan cara mempertahankan putaran motor BLDC pada 200 rpm (dimana $V_{emf,L-L}=10$ volt) kemudian nilai duty cycle dibuat bervariasi dari 0,1 hingga 0,8. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah. Tabel 5.6 menunjukkan hasil pengujian RBS pada mode regeneratif, dan Tabel 5.7 menunjukkan hasil pengujian RBS dalam mode regeneratif-*plugging*.

Tabel 5.6 Pengujian RBS dengan beban baterai 48V, mode regeneratif.

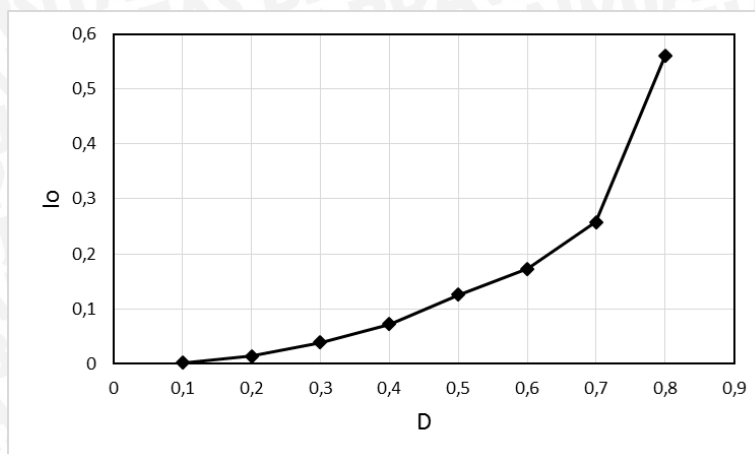
$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)
10	10,27	0,064	0,1	50,5	0,002
10	10,04	0,163	0,2	50,6	0,014
10	10,50	0,320	0,3	50,6	0,039
10	10,96	0,512	0,4	50,6	0,072
10	11,77	0,762	0,5	50,7	0,126
10	12,00	1,044	0,6	50,7	0,173
10	12,38	1,430	0,7	50,8	0,258
10	11,90	4,750	0,8	51,3	0,560

Tabel 5.7 Pengujian RBS dengan beban baterai 48V, mode regeneratif-*plugging*.

$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)
10	10,64	0,385	0,1	50,4	-0,053
10	15,70	1,230	0,2	50,3	-0,066
10	19,52	2,250	0,3	50,4	-0,041
10	22,35	4,820	0,4	50,1	-0,087

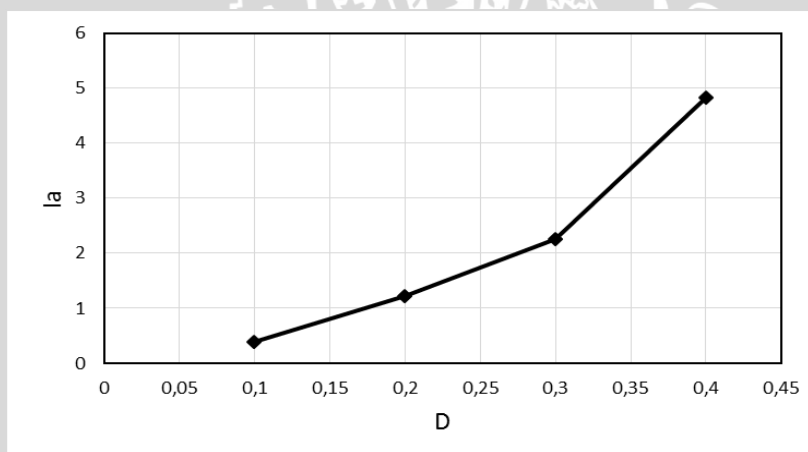


Gambar 5.22 Karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif, beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10$ V.



Gambar 5.23 Karakteristik arus keluaran (I_o) terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif, beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10V$.

Pada gambar 5.22 menunjukkan karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif. Terlihat bahwa arus jangkar naik seiring dengan bertambahnya *duty cycle*. Kenaikan yang cukup besar terjadi pada *duty cycle* 0,8. Hal ini menyebabkan arus *charging* juga meningkat cukup besar seperti terlihat pada gambar 5.23.



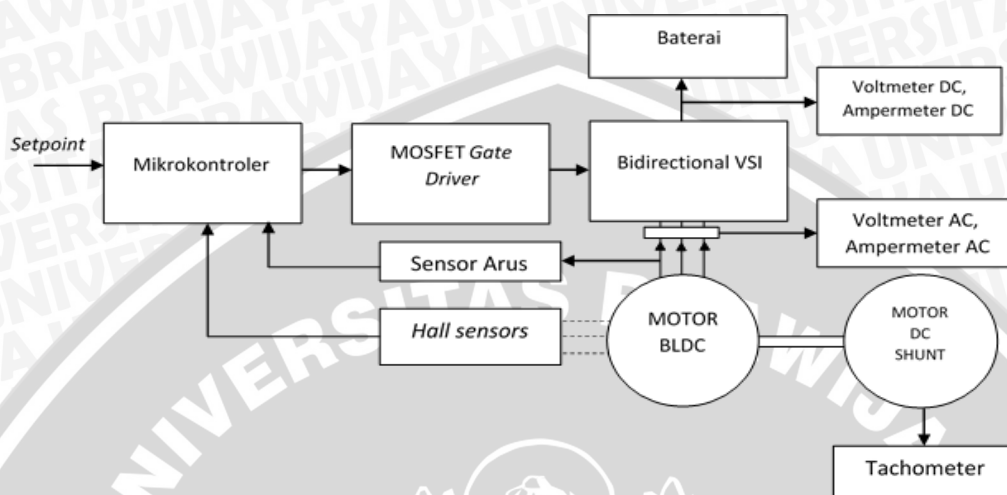
Gambar 5.24 Karakteristik arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif-plugging, beban baterai 48V, $V_{emf,L-L}=10V$.

Gambar 5.24 menunjukkan karakteristik kenaikan arus jangkar terhadap *duty cycle* pada mode regeneratif-plugging. Kenaikan arus jangkar cenderung linier, namun gradien kenaikannya cukup besar, sedangkan untuk tegangan baterai pada pengujian ini cenderung konstan. Pada pengujian ini juga terlihat bahwa arus pada baterai (I_o) menunjukkan angka minus, yang artinya pada kondisi ini baterai mengeluarkan daya untuk proses pengereman.

5.8 Pengujian RBS secara *closed loop*

Pengujian ini bertujuan untuk melihat besar *Error Steady State* (ESS) dalam loop tertutup. Selain itu pengujian ini juga bertujuan mengetahui besar efisiensi konverter pada

kedua mode pengereman. Peralatan yang digunakan antara lain adalah *Bidirectional VSI* beserta unit kontrol, motor BLDC, motor DC *shunt*, Baterai, voltmeter dan amperemeter DC, voltmeter dan amperemeter AC, tachometer, sensor arus sebagai *feedback*. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar 5.25.



Gambar 5.25 Rangkaian RBS secara *closed loop*.

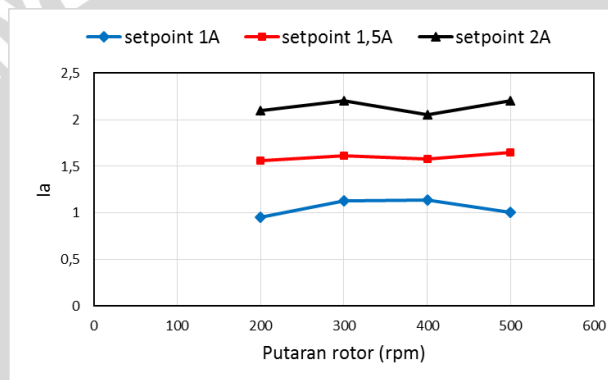
Pengujian dilakukan dengan cara mengatur *setpoint* arus pengereman pada nilai tertentu, kemudian memutar motor BLDC dengan penggerak lain pada beberapa variasi kecepatan. Mode regeneratif dan regeneratif-*plugging* diuji secara terpisah. Tabel 5.8 menunjukkan hasil pengujian RBS pada mode regeneratif, dan Tabel 5.9 menunjukkan hasil pengujian RBS dalam mode regeneratif-*plugging*.

Tabel 5.8 Pengujian RBS secara *closed loop* dalam mode regeneratif.

Putaran rotor (rpm)	$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a set (A)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)	η (dalam %)
200	10	12,02	1,0	0,950	0,56	50,6	0,166	42,47
300	15	17,35	1,0	1,130	0,42	50,7	0,304	45,39
400	20	22,06	1,0	1,140	0,35	50,9	0,454	53,05
500	25	26,50	1,0	1,005	0,25	51,0	0,583	64,46
200	10	12,32	1,5	1,560	0,73	50,7	0,271	41,27
300	15	17,67	1,5	1,610	0,57	51,0	0,525	54,34
400	20	22,09	1,5	1,580	0,45	51,2	0,807	68,35
500	25	26,15	1,5	1,650	0,34	51,2	0,930	63,71
200	10	12,60	2,0	2,100	0,77	51,1	0,624	69,58
300	15	17,67	2,0	2,200	0,63	51,1	0,724	54,95
400	20	22,24	2,0	2,057	0,50	51,4	1,036	67,20
500	25	26,30	2,0	2,200	0,40	51,8	1,330	68,75

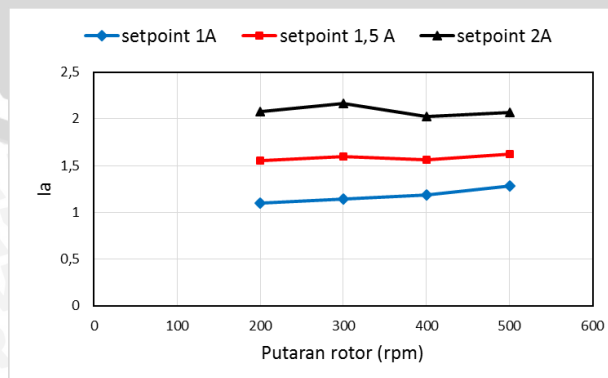
Tabel 5.9 Pengujian RBS secara *closed loop* dalam mode regeneratif-plugging.

Putaran rotor (rpm)	$V_{emf,L-L}$ (V)	V_{L-L} (V)	I_a set (A)	I_a (A)	D	V_o (V)	I_o (A)	η (dalam %)
200	10	14,91	1,0	1,096	0,20	50,67	-0,041	-7,34
300	15	18,61	1,0	1,140	0,18	50,81	0,120	16,59
400	20	22,18	1,0	1,189	0,17	50,98	0,288	32,14
500	25	27,17	1,0	1,280	0,13	51,33	0,525	44,74
200	10	16,96	1,5	1,550	0,27	50,20	-0,052	-5,73
300	15	20,28	1,5	1,600	0,24	50,80	0,122	11,03
400	20	24,08	1,5	1,560	0,22	51,40	0,356	28,12
500	25	29,08	1,5	1,620	0,18	52,00	0,550	35,05
200	10	17,26	2,0	2,080	0,34	50,40	-0,043	-3,49
300	15	20,89	2,0	2,165	0,30	50,80	0,212	13,75
400	20	24,56	2,0	2,023	0,23	51,10	0,392	23,28
500	25	30,20	2,0	2,067	0,20	51,80	0,600	28,75



Gambar 5.26 Karakteristik arus jangkar terhadap putaran motor, mode regeneratif.

Gambar 5.26 menunjukkan bahwa ketika kecepatan dibuat bervariasi dari 200 rpm hingga 500 rpm, mode regeneratif dalam *loop* tertutup masih mengalami *Error Steady State* (ESS). Hal ini disebabkan karena kecilnya sensitifitas sensor ACS712-20A yang menyebabkan mikrokontroler kesulitan untuk mendeteksi nilai tegangan yang dikeluarkan sensor secara teliti.



Gambar 5.27 Karakteristik arus jangkar terhadap putaran motor, mode regeneratif-plugging.

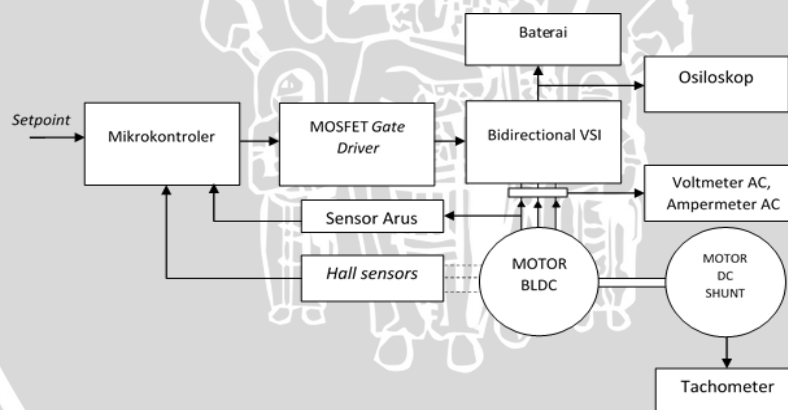
Seperti halnya mode regeneratif, mode regeneratif-*plugging* juga mengalami *error steady state*. Hal ini disebabkan karena kecilnya sensitifitas sensor ACS712-20A yang menyebabkan mikrokontroler kesulitan untuk mendeteksi nilai tegangan yang dikeluarkan sensor secara teliti.

Pada mode regeneratif didapatkan nilai *ESS* terbesar adalah sebesar 0,2 A, sedangkan untuk mode regeneratif-*plugging* didapatkan nilai *ESS* terbesar adalah 0,28A. *ESS* rata-rata untuk mode regeneratif adalah 0,1068 A, sedangkan untuk mode regeneratif-*plugging* sebesar 0,114 A.

Pada nilai efisiensi terlihat bahwa pada kecepatan dan *setpoint* arus yang sama efisiensi konverter pada mode regeneratif lebih baik dari regeneratif-*plugging*. Efisiensi rata-rata untuk mode regeneratif adalah 57,8%, sedangkan untuk mode regeneratif-*plugging* sebesar 18,07%.

5.9 Pengujian regenerasi energi.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui energi kinetik yang dapat dikembalikan ke baterai. Peralatan yang digunakan antara lain adalah *Bidirectional VSI* beserta unit kontrol, motor BLDC, motor DC *shunt*, Baterai, voltmeter dan amperemeter DC, voltmeter dan amperemeter AC, tachometer, sensor arus sebagai *feedback*. Konfigurasi rangkaian percobaan seperti terlihat pada gambar 5.28.

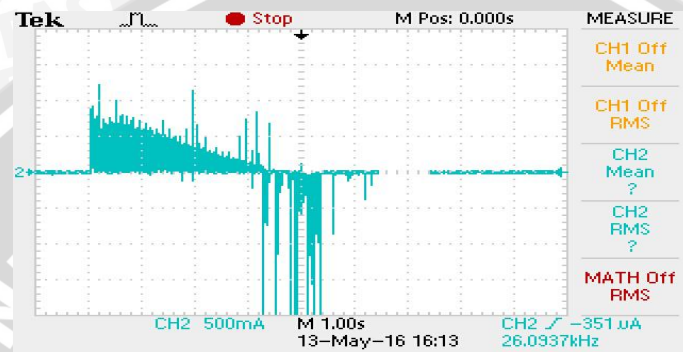


Gambar 5.28 Rangkaian pengujian regenerasi energi.

Pengujian ini dilakukan dengan cara memutar motor BLDC dengan penggerak lain hingga kecepatan tertentu, kemudian dilakukan pengereman dengan *setpoint* tertentu hingga motor berhenti. Arus dan tegangan pada baterai direkam dalam bentuk numerik pada osiloskop untuk menghitung energi yang dapat dikembalikan ke baterai. Pengujian ini dilakukan dengan kecepatan awal motor 30km/jam, dan 40 km/jam. Pada masing-masing kecepatan dilakukan pengereman dengan *setpoint* arus 1,2,3,4 dan 5A. Gambar 5.29 menunjukkan gambar arus dan tegangan pengisian baterai pada *setpoint* 4A.



(a)



(b)

Gambar 5.29 Bentuk gelombang tegangan (a) dan arus (b) pada baterai VRLA 12V 100Ah X 4 (seri) dengan *setpoint* 4A dan kecepatan awal 30 km/jam.

Perhitungan energi dilakukan dengan cara mengalikan tegangan dan arus masukan baterai untuk mendapat daya sesaat. Daya total didapatkan dengan menambahkan semua daya sesaat. Daya rata-rata didapatkan dengan membagi daya total terhadap jumlah data *sampling*. Sedangkan energi didapatkan dengan mengalikan daya rata-rata dengan waktu pengereman. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_{AV} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{dc(i)} \cdot i_{dc(i)}}{n} \quad (5-6)$$

$$E_{output} = P_{AV} \cdot t_{braking} = \eta_{sistem} \times E_k \quad (5-7)$$

sedangkan untuk torsi elektromagnetik dapat dihitung dari persamaan 5-4.

$$T_{em} = 0,827I_a$$

5.9.1 Pengereman lengkap

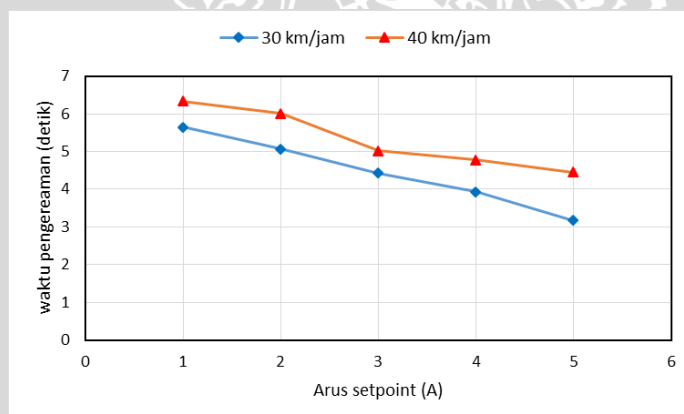
Berikut ini adalah tabel waktu pengereman, daya rata-rata pengereman, dan energi yang dikembalikan selama pengereman. Tabel 5.10 untuk kecepatan awal roda 30 km/jam, dan tabel 5.11 untuk kecepatan awal roda 40 km/jam.

Tabel 5.10 Pengujian RBS dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.

Setpoint	T_{em} (Nm)	Waktu (detik)	Daya Rata-rata (watt)	Energi (Wh)
1 A	0,827	5,640	6,314	0,00989
2 A	1,654	5,068	6,650	0,00936
3 A	2,481	4,428	8,435	0,01037
4 A	3,308	3,932	9,961	0,01088
5 A	4,135	3,164	11,776	0,01035
		Rata-Rata		0,01017

Tabel 5.11 Pengujian RBS dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.

Setpoint	T_{em} (Nm)	Waktu (detik)	Daya Rata-rata (watt)	Energi (Wh)
1 A	0,827	6,336	8,643	0,0150
2 A	1,654	6,012	9,604	0,0160
3 A	2,481	5,012	11,737	0,0160
4 A	3,308	4,780	16,397	0,0220
5 A	4,135	4,452	19,071	0,0240
		Rata-Rata		0,0186

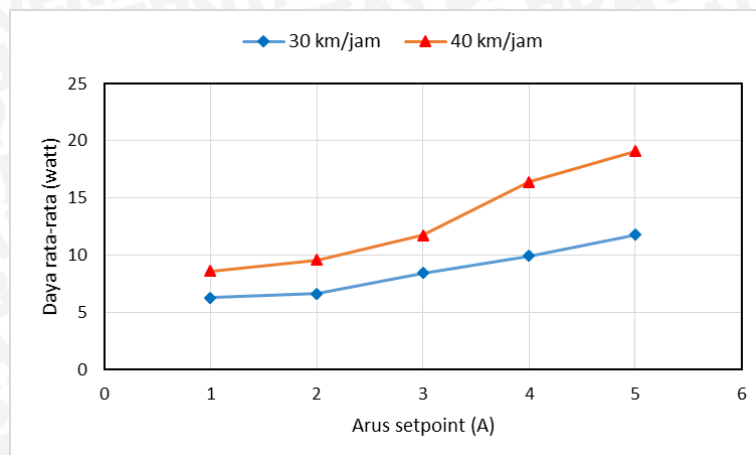


Gambar 5.30 Karakteristik waktu pengereman terhadap setpoint, dengan variasi kecepatan awal mesin.

Gambar 5.30 menunjukkan karakteristik waktu pengereman terhadap *setpoint*, dengan variasi kecepatan awal mesin. Terlihat bahwa semakin besar *setpoint*, maka waktu pengereman (t) akan semakin singkat. Hal ini disebabkan oleh torsi pengereman yang semakin besar akan menyebabkan nilai perlambatan juga semakin besar. Perlambatan dan waktu pengereman berturut-turut dinyatakan sebagai $\alpha = \frac{\tau}{I}$ dan $t = \frac{\omega_o}{\alpha}$. Sehingga hubungan waktu dan torsi pengereman dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$t = \frac{\omega_o I}{\tau} \quad (5-8)$$

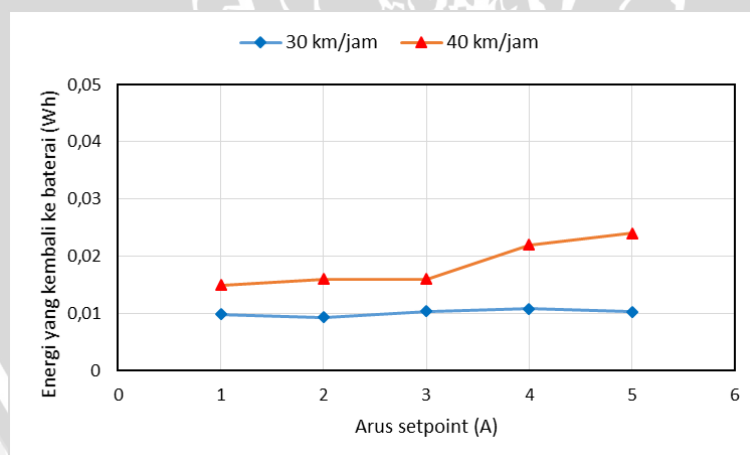
dengan ω_o , I dan τ berturut-turut adalah kecepatan awal, inersia dan torsi pengereman.



Gambar 5.31 Karakteristik daya rata-rata pengereman terhadap *setpoint*, dengan variasi kecepatan awal mesin.

Gambar 5.31 menunjukkan karakteristik daya rata-rata pengereman terhadap *setpoint*, dengan variasi kecepatan awal mesin. Terlihat bahwa daya rata-rata akan semakin besar seiring bertambahnya *setpoint*. Hal ini disebabkan karena semakin besar arus pengereman (torsi pengereman), maka daya rata-rata pengereman juga akan semakin besar. Hubungan daya rata-rata (P_{AV}) dan torsi pengereman dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{AV} = \eta_{sistem} \tau \omega_{AV} = \eta_{sistem} \tau \left(\frac{1}{2} \omega_o \right) \quad (5-9)$$



Gambar 5.32 Karakteristik energi pengereman elektrik terhadap *setpoint*, dengan variasi kecepatan awal mesin.

Gambar 5.32 menunjukkan bahwa energi yang dapat dikembalikan ke baterai cenderung konstan untuk kecepatan awal yang sama. Hal ini disebabkan karena ketika *setpoint* dinaikkan daya rata-rata pengereman juga akan naik, namun waktu pengereman akan semakin singkat. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa energi terbesar yang dapat dikembalikan ke baterai adalah 0,01088 Wh untuk kecepatan awal 30 km/jam dan 0,0236

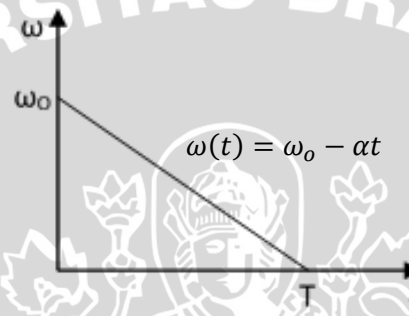
Wh untuk kecepatan awal 40 km/jam. Energi rata-rata yang dapat dikembalikan ke baterai adalah 0,01 Wh pada kecepatan 30 km/jam dan 0,0186 Wh pada kecepatan 40 km/jam dengan beban inersia mesin dan roda.

Inersia mesin dan roda dapat dihitung menggunakan persamaan 2-26. Dengan mengetahui masa motor sebesar 8,5 kg dengan jari-jari sebesar 15 cm, dan masa roda sebesar 1,5 kg dengan jari-jari sebesar 25,5, maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{2}(8,5) \cdot (0,15^2) + \frac{1}{2}(1,5)(0,15^2 + 0,255^2) = 0,161269 \left(\frac{\text{Nm} \cdot \text{sec}^2}{\text{rad}} \right)$$

didapatkan Inersia mesin dan roda adalah sebesar 0,161269 Nm.sec²/rad.

Persamaan energi kinetik mesin dan roda dapat diturunkan sebagai berikut:



Gambar 5.33 Kurva kecepatan terhadap waktu pada proses perlambatan.

$$\omega_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T (\omega_o - \alpha t) dt = \omega_o - \frac{1}{2} \alpha T$$

karena $\alpha = \frac{\omega_o}{T}$

$$\omega_{AV} = \omega_o - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_o}{T} \right) T = \frac{1}{2} \omega_o$$

$$E_k = P_{mek AV} \cdot T = \tau \cdot \omega_{AV} \cdot T = \tau \cdot \left(\frac{1}{2} \omega_o \right) \cdot T$$

karena $\tau = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{\omega_o}{T}$

$$E_k = \left(I \cdot \frac{\omega_o}{T} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} \omega_o \right) \cdot T$$

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega_o^2$$

(5- 10)

- Kecepatan awal 30km/jam $E_k = \frac{1}{2} 0,161269 \cdot 32,67^2 = 0,0239 \text{ Wh}$
- Kecepatan awal 40km/jam $E_k = \frac{1}{2} 0,161269 \cdot 43,57^2 = 0,0425 \text{ Wh}$

prosentase energi kinetik yang dapat dikembalikan ke baterai adalah sebagai berikut:

$$\% \text{ Energi kembali }_{(30\text{km/jam})} = \frac{0,01}{0,0239} \times 100\% = 41,82\%$$

$$\% \text{ Energi kembali }_{(40\text{km/jam})} = \frac{0,0186}{0,0425} \times 100\% = 43,74\%$$

5.9.2 Pengereman regeneratif saja

Selain melakukan perhitungan energi untuk pengereman lengkap, juga dilakukan perhitungan energi untuk pengereman regeneratif saja. Tujuan perhitungan ini adalah untuk membandingkan energi yang dapat dikembalikan untuk pengereman regeneratif murni dan pengereman regeneratif-*plugging*.

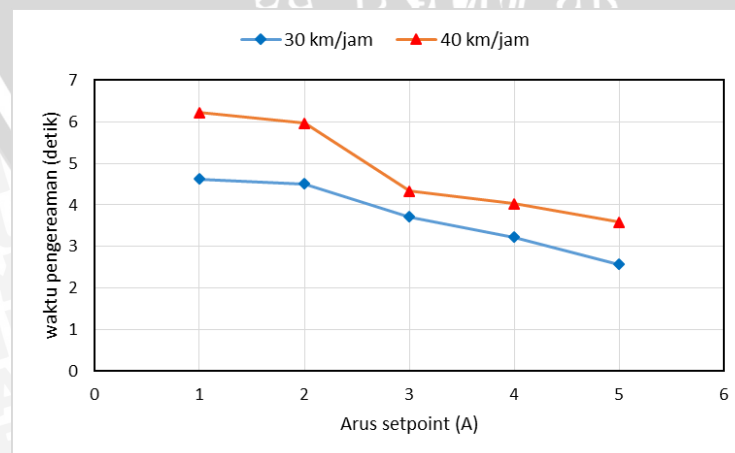
Berikut ini adalah tabel waktu pengereman, daya rata-rata pengereman, dan energi yang dikembalikan selama pengereman. Tabel 5.12 untuk kecepatan awal roda 30 km/jam, dan tabel 5.13 untuk kecepatan awal roda 40 km/jam.

Tabel 5.12 Pengujian RBS (pada mode regeneratif saja) dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 30 km/jam.

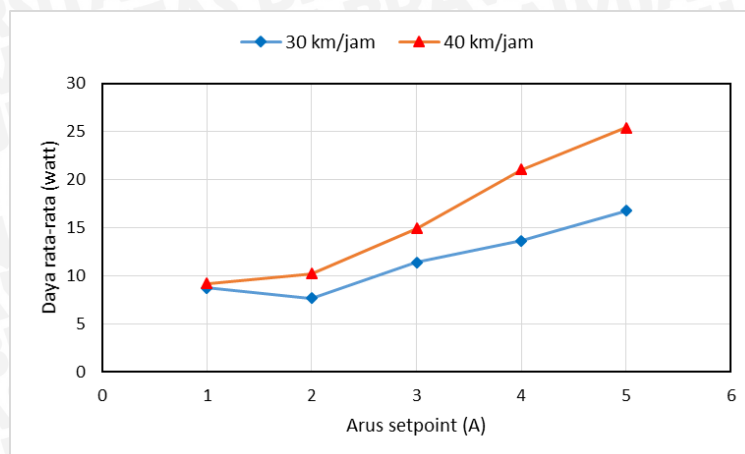
Setpoint	Waktu (detik)	Daya Rata-rata (watt)	Energi (Wh)	Energi yang hilang	%Energi hilang
1 A	4,628	8,720	0,0110	0,0013179	11,76
2 A	4,508	7,679	0,0100	0,0002547	2,65
3 A	3,716	11,373	0,0120	0,0013643	11,62
4 A	3,220	13,642	0,0120	0,0013218	10,83
5 A	2,572	16,769	0,0120	0,0016303	13,61
Rata-Rata			0,0114	0,0011778	10,09

Tabel 5.13 Pengujian RBS (pada mode regeneratif saja) dengan beban inersia mesin dan roda, dengan kecepatan awal 40 km/jam.

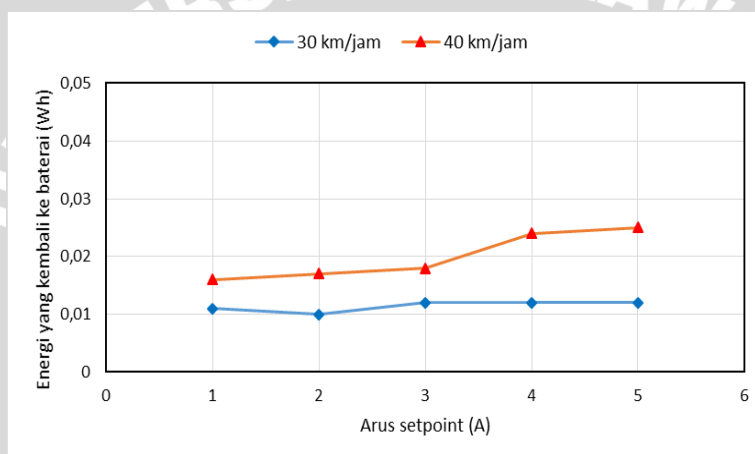
Setpoint	Waktu (detik)	Daya Rata-rata (watt)	Energi (Wh)	Energi yang hilang	%Energi hilang
1 A	6,216	9,204	0,016	0,0006806	4,28
2 A	5,960	10,235	0,017	0,0009058	5,35
3 A	4,332	14,907	0,018	0,0015980	8,91
4 A	4,024	21,036	0,024	0,0017421	7,41
5 A	3,588	25,363	0,025	0,0016938	6,70
Rata-Rata			0,020	0,0013241	6,53



Gambar 5.34 Karakteristik waktu pengereman terhadap *setpoint* (mode regeneratif saja), dengan variasi kecepatan awal mesin.



Gambar 5.35 Karakteristik daya rata-rata pengereman terhadap *setpoint* (mode regeneratif saja), dengan variasi kecepatan awal mesin.



Gambar 5.36 Karakteristik energi pengereman (mode regeneratif saja) terhadap *setpoint*, dengan variasi kecepatan awal mesin.

Gambar 5.34 dan 5.35 berturut-turut menunjukkan karakteristik waktu pengereman dan daya rata-rata pengereman terhadap pengereman, sedangkan gambar 5.36 menunjukkan energi yang dapat dikembalikan pada mode pengereman regeneratif saja. Energi terbesar yang hilang saat mode regeneratif-*plugging* adalah 13,6% dan yang terkecil 2,6% dari energi pengereman regeneratif murni. Energi rata-rata yang hilang saat kecepatan awal 30 km/jam adalah 10,1 % dan saat kecepatan awal 40 km/ jam sebesar 6,53 % dari energi pengereman regeneratif saja.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Perancangan *Regeneratif Braking System* (RBS) menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI) dilakukan dengan dua mode yaitu regeneratif murni dan regeneratif-plugging. Pengereman regeneratif murni dilakukan dengan cara mengoperasikan inverter menyerupai rangkaian *boost converter* untuk menaikkan level tegangan pada sisi baterai. Dengan demikian arus dapat mengalir dari motor ke baterai ketika pengereman berlangsung. Mode pengereman regeneratif-plugging dilakukan dengan cara membalik medan putar dari motor namun dikontrol secara PWM. Arus mengalir dari baterai menuju belitan motor ketika saklar *on* (plugging) selama DT, dan dari belitan motor menuju baterai melalui *freewheeling* dioda saat saklar *off* (regeneratif) selama $(1-D)T$.
2. Mewujudkan torsi pengereman sesuai dengan yang diinginkan dapat dilakukan dengan cara mengontrol arus pengereman pada belitan jangkar. Dengan mengontrol *duty cycle* secara otomatis menyesuaikan *error* antara *setpoint* dengan nilai arus sebenarnya, maka arus pengereman dapat diatur dengan mengubah nilai *setpoint*. Mode pengereman regeneratif akan diterapkan ketika *duty cycle* VSI yang dioperasikan sebagai *boost converter* bernilai antara 0 sampai 90%. Ketika *duty cycle* mode regeneratif lebih besar dari 90% dan arus pengereman belum mencapai nilai *setpoint*, maka mode pengereman akan secara otomatis berubah menjadi Regeneratif-plugging. Pada mode ini *duty cycle* juga akan dikontrol secara otomatis untuk mengatur arus pengereman.
3. Arus pengereman meningkat seiring bertambahnya *duty cycle* pada mode pengereman regeneratif dan regeneratif-plugging. Peningkatan arus pengereman tidak bersifat linier.
4. Untuk kecepatan awal mesin yang bervariasi maka energi yang dihasilkan oleh sistem pengereman regeneratif juga akan bervariasi. Semakin besar nilai kecepatan awal mesin, energi yang dihasilkan semakin besar pula. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa energi terbesar yang dapat dikembalikan ke baterai adalah 0,01088 Wh untuk kecepatan awal 30 km/jam dengan *setpoint* arus pengereman 4 A, dan 0,0236 Wh untuk kecepatan awal 40 km/jam dengan *setpoint* arus pengereman 5A. Energi rata-

rata yang dapat dikembalikan ke baterai adalah sebesar 0,01 Wh untuk kecepatan awal 30 km/jam dan 0,0186 Wh untuk kecepatan awal 40 km/jam. Apabila dibandingkan dengan besar energi kinetik yang dimiliki roda saat berputar, maka didapatkan prosentase energi yang dapat dikembalikan ke baterai sebesar 41,82% untuk kecepatan 30km/jam, dan sebesar 43,74% untuk kecepatan 40km/jam. Energi rata-rata yang hilang untuk pengereman *plugging* adalah 10.1 % saat kecepatan awal 30 km/jam dan sebesar 6,83 % saat kecepatan awal 40 km/ jam dari energi pengereman regeneratif murni. Pengujian dilakukan dengan beban inersia mesin motor dan roda.

6.2. Saran

Pengujian *Regenerative Braking System* dalam *loop* tertutup masih menunjukkan *error* yang signifikan terhadap nilai *set point*. Hal ini disebabkan oleh sensitivitas sensor arus yang kecil.

Metode pembacaan arus yang diterapkan pada sistem ini adalah hanya dengan mendeteksi puncak tertinggi gelombang arus pada fasa motor. Namun dimungkinkan arus yang memiliki puncak yang sama, pada mode pensaklaran ataupun putaran motor yang berbeda akan memiliki nilai efektif yang berbeda akibat harmonisa. Hal ini akan menyebabkan torsi pengereman tidak konstan, meskipun *setpoint* tetap. Maka dari itu dibutuhkan rangkaian dan algoritma pengendalian arus yang lebih baik untuk menjaga nilai efektif arus pengereman.

Diperlukan algoritma program yang dapat mendeteksi puncak arus dan mengoreksi *duty cycle* setiap 1 siklus elektrik, menyesuaikan frekuensi rotor. Untuk pendeteksian siklus elektrik dapat memanfaatkan *feedback Hall sensors*. Dengan demikian respon sistem akan lebih cepat dan stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Brown, W. 2002. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. Microchip Technology Inc.
- Douglas, D.N. 1985. *Magnetic Position Sensing in Brushless DC Electric Motors*. Application note.
- Fahmi, A.A., Ashari, M. & Suryoatmojo, H. 2013. *Sistem Pengereman Elektris Brushless DC Motor Menggunakan Bidirectional Inverter untuk Aplikasi Kendaraan Listrik*. Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS. (1) 1: 1-6.
- Hamdi, I.T. 2015. *Rancang Bangun Three Phase Six Step PWM Inverter sebagai Pedal Assisted System (Pas) Sepeda Listrik*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hariyanto, A.E. 2015. *Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif Untuk Mengisi Baterai*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hart, D.W. 2011. *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Gamazo, J.C., Sánchez, E.V. & Gil, J.G. 2010. *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. Spanyol: University of Valladolid.
- Lu, S., Corzine, K.A. & Ferdowsi, M. 2007. *A New Battery/Ultracapacitor Energy Storage System Design and Its Motor Drive Integration for Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Transactions. Vehicular. Technology, vol. 56, no. 4, pp. 1516–1523.
- Nian, X., Peng, F. & Zhang, H. 2014. *Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. 61 (10): 5798-5808.
- Purnama, A. 2012. *Elektronika Dasar*. <http://elektronika-dasar.web.id/mosfet-sebagai-saklar/> (diakses 12 Juni 2016).
- Putra, A.D. 2015. *Penerapan Kontroler Self Tuning Parameter Pi dengan Metode Logika Fuzzy Pada Mobile Robot*. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.
- Rashid, M.H. 2004. *Power Electronics*. London: Pearson Prentice Hall.
- Sen, P.C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Wengi, H.R.P.S. & Yuniarto, M.N. 2014. *Perancangan dan Uji Performa Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless Direct Current (DC) Motor*. Jurnal Teknis POMITS. (1) 1-7.
- Wahl, E. 2014. *Brushless DC Motors*. (lecture note)

Xia, C.L. 2012. *Permanent Magnet Brushless Dc Motor Drives and Controls*. Singapore: John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd.

Yang, Y.P. & Hu, T.H. *A New Energy Management System of Directly-Driven Electric Vehicle With Electronic Gearshift and Regenerative Braking*. Proceedings American Control Conference. pp. 4419–4424.

Zao, J. & Yu, Y. 2011. *Brushless DC Motor Fundamentals*. Application note.





LAMPIRAN

Lampiran 1: Listing Program

```

#include <LiquidCrystal.h>
#define S1 OCR1A    //Mega pin 11
#define S4 OCR1B    //Mega pin 12
#define S3 OCR3A    //Mega pin 5
#define S6 OCR3B    //Mega pin 2
#define S5 OCR4A    //Mega pin 6
#define S2 OCR4B    //Mega pin 7
#define H1 51
#define H2 52
#define H3 53
#define CURRENT_SENSOR A1
int sensor_max, now, last=0, periode;
int setpoint;
float x, duty, err, errx=0, ut, v, a=1;
float kp=4, ki=2;
LiquidCrystal lcd(35, 33, 31, 29, 27, 25);
void setup()
{
    // put your setup code here, to run once:
    noInterrupts();
    pinMode(H1, INPUT);
    pinMode(H2, INPUT);
    pinMode(H3, INPUT);
    pinMode(CURRENT_SENSOR, INPUT);
    DDRB=(1<<DDB6) | (1<<DDB5);
    DDRE=(1<<DDE4) | (1<<DDE3);
    DDRH=(1<<DDH4) | (1<<DDH3);
    TCCR1A=(1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (1<<COM1B1) | (0<<COM1B0) |
(0<<COM1C1) | (0<<COM1C0) | (0<<WGM11) | (0<<WGM10);
    TCCR1B=(0<<ICNC1) | (0<<ICES1) | (1<<WGM13) | (0<<WGM12) |
(0<<CS12) | (0<<CS11) | (1<<CS10);
    ICR1H=0x01;
    ICR1L=0x40;
    TCCR3A=(1<<COM3A1) | (0<<COM3A0) | (1<<COM3B1) | (0<<COM3B0) |
(1<<COM3C1) | (0<<COM3C0) | (0<<WGM31) | (0<<WGM30);
    TCCR3B=(0<<ICNC3) | (0<<ICES3) | (1<<WGM33) | (0<<WGM32) |
(0<<CS32) | (0<<CS31) | (1<<CS30);
    ICR3H=0x01;
    ICR3L=0x40;
    TCCR4A=(1<<COM4A1) | (0<<COM4A0) | (1<<COM4B1) | (0<<COM4B0) |
(0<<COM4C1) | (0<<COM4C0) | (0<<WGM41) | (0<<WGM40);
    TCCR4B=(0<<ICNC4) | (0<<ICES4) | (1<<WGM43) | (0<<WGM42) |
(0<<CS42) | (0<<CS41) | (1<<CS40);
    ICR4H=0x01;
    ICR4L=0x40;
    EICRA=(0<<ISC31) | (0<<ISC30) | (1<<ISC21) | (1<<ISC20) |
(1<<ISC11) | (1<<ISC10) | (1<<ISC01) | (1<<ISC00);
    EIMSK=(0<<INT7) | (0<<INT6) | (0<<INT5) | (0<<INT4) | (0<<INT3)
| (1<<INT2) | (1<<INT1) | (1<<INT0);
    EIFR=(0<<INTF7) | (0<<INTF6) | (0<<INTF5) | (0<<INTF4) |
(0<<INTF3) | (1<<INTF2) | (1<<INTF1) | (1<<INTF0);
    PCMSK0=(0<<PCINT7) | (0<<PCINT6) | (0<<PCINT5) | (0<<PCINT4) |
(0<<PCINT3) | (1<<PCINT2) | (1<<PCINT1) | (1<<PCINT0);
    PCICR=(0<<PCIE2) | (0<<PCIE1) | (1<<PCIE0);

```

```

    lcd.begin(16, 4);
    lcd.print("Victor Project");
    delay(1000);
    interrupts();
}
ISR(PCINT0_vect) //interrupt service routine
{
    if (a<=10)
    {
        switch (PINB&0x07) //Regenerative
        {
            case 0b100: S1=0; S2=0; S3=0; S4=x; S5=0; S6=0; break;
            case 0b110: S1=0; S2=0; S3=0; S4=0; S5=0; S6=x; break;
            case 0b010: S1=0; S2=0; S3=0; S4=0; S5=0; S6=x; break;
            case 0b011: S1=0; S2=x; S3=0; S4=0; S5=0; S6=0; break;
            case 0b001: S1=0; S2=x; S3=0; S4=0; S5=0; S6=0; break;
            case 0b101: S1=0; S2=0; S3=0; S4=x; S5=0; S6=0; break;
        }
    }
    else
    {
        switch (PINB&0x07) // regenerative+plugging
        {
            case 0b100: S1=0; S2=0; S3=0; S4=x; S5=x; S6=0; break;
            case 0b110: S1=0; S2=0; S3=0; S4=0; S5=x; S6=x; break;
            case 0b010: S1=x; S2=0; S3=0; S4=0; S5=0; S6=x; break;
            case 0b011: S1=x; S2=x; S3=0; S4=0; S5=0; S6=0; break;
            case 0b001: S1=0; S2=x; S3=x; S4=0; S5=0; S6=0; break;
            case 0b101: S1=0; S2=0; S3=x; S4=x; S5=0; S6=0; break;
        }
    }
}

void loop()
{
    setpoint = analogRead(A0);
    setpoint=setpoint*0.2903226+503;
    sensor_max = getMaxValue();
    PI_method();
    Display();
}

int getMaxValue()
{
    int sensorValue; //value read from the sensor
    int sensorMax = 0;
    uint32_t start_time = millis();
    while((millis()-start_time) < 100)//sample for 100ms cuz
    frekuensi motor terkecil 10 Hz
    {
        sensorValue = analogRead(CURRENT_SENSOR);
        if (sensorValue > sensorMax)
        {
            sensorMax = sensorValue;
        }
    }
    return sensorMax;
}

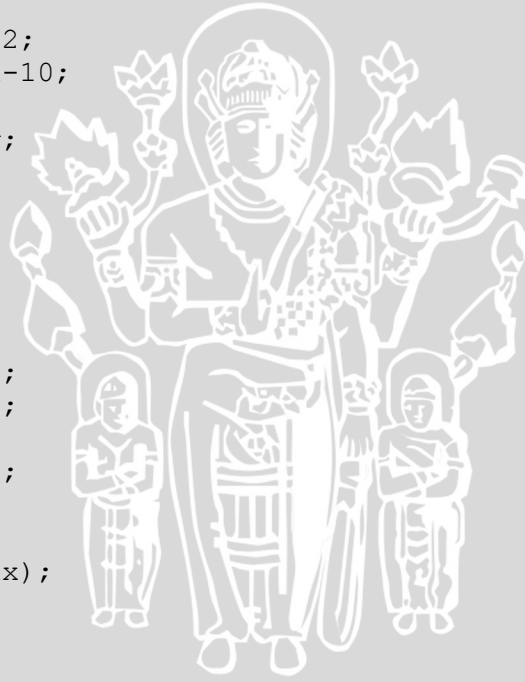
```

```

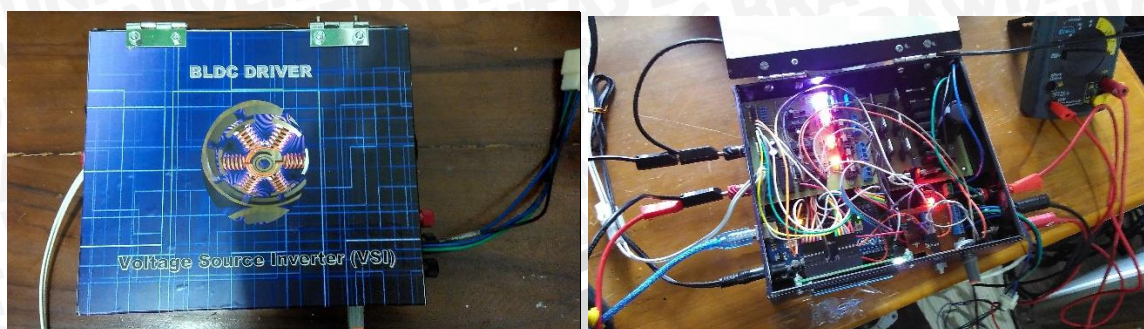
void PI_method()
{
    err=setpoint-sensor_max;
    ut=kp*err+ki*(err-errx);
    errx=err;
    a=a+(float)ut/500;
    if (a<=1)
    {
        a=1;
        v=a;
    }
    else if (a<=10)
    {
        v=a;
    }
    else if (a<12)
    {
        v=a-10;
    }
    else if (a>=12)
    {
        a=12;
        v=a-10;
    }
    duty=1-(float)1/v;
    x=duty*320;
}

void Display()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(setpoint);
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print(a);
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(duty);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(sensor_max);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print(ut);
    if (a<=10){
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("Regenerative");
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("R+Plugging");
    }
}

```



Lampiran 2: Gambar alat



(a)

(b)

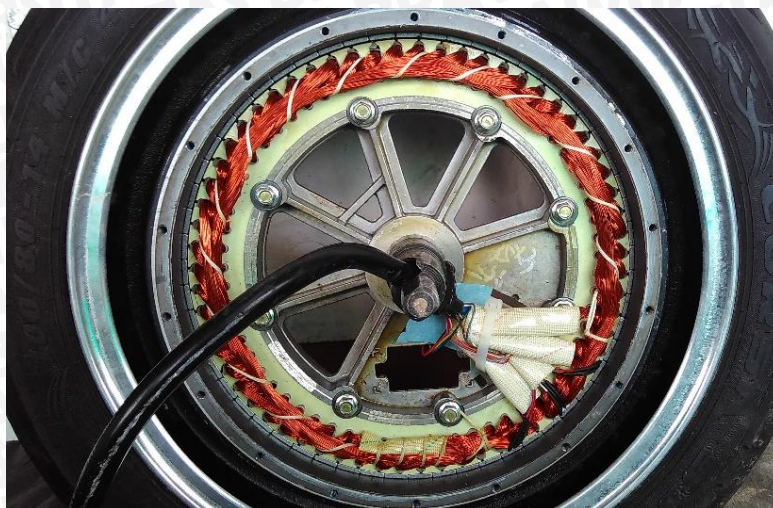
Gambar L2. 1 Tampilan *Voltage Source Inverter* (a) Tampak atas (b) Tampak dalam



Gambar L2. 2 Proses *Pengujian Regeneratif Braking System*.



Gambar L2. 3 Baterai yang digunakan dalam pengujian



Gambar L2. 4 Motor BLDC tampak dalam.



Gambar L2. 5 Proses pengujian VSI dalam mode *Motoring*

Lampiran 3: Perhitungan nilai frekuensi pensaklaran MOSFET dan nilai kapasitor kompensasi *ripple* tegangan keluaran.

A. Perhitungan nilai frekuensi pensaklaran.

$V_{emf,L-L}$ (V)	I_a (A)	D (Regent)	D (R-Plug)	V_o (V)	I_o (A)	f_{sw} (Hz) (Regent)	f_{sw} (Hz) (R-plug)
0,5	5	0,986	0,493	48,090	0,090	594,927	21464,529
1,0	5	0,972	0,486	48,180	0,180	1172,957	21491,889
1,5	5	0,958	0,479	48,269	0,269	1734,184	21510,699
2,0	5	0,944	0,472	48,358	0,358	2278,701	21521,008
2,5	5	0,930	0,465	48,447	0,447	2806,599	21522,862
3,0	5	0,916	0,458	48,535	0,535	3317,967	21516,308
3,5	5	0,903	0,451	48,623	0,623	3812,894	21501,392
4,0	5	0,889	0,445	48,711	0,711	4291,467	21478,158
4,5	5	0,875	0,438	48,799	0,799	4753,771	21446,652
5,0	5	0,862	0,431	48,886	0,886	5199,891	21406,916
5,5	5	0,848	0,424	48,973	0,973	5629,912	21358,995
6,0	5	0,835	0,417	49,059	1,059	6043,914	21302,930
6,5	5	0,821	0,411	49,145	1,145	6441,980	21238,765
7,0	5	0,808	0,404	49,231	1,231	6824,189	21166,539
7,5	5	0,794	0,397	49,317	1,317	7190,621	21086,294
8,0	5	0,781	0,391	49,402	1,402	7541,354	20998,071
8,5	5	0,768	0,384	49,487	1,487	7876,464	20901,908
9,0	5	0,755	0,377	49,572	1,572	8196,028	20797,847
9,5	5	0,741	0,371	49,657	1,657	8500,120	20685,924
10,0	5	0,728	0,364	49,741	1,741	8788,815	20566,178
10,5	5	0,715	0,358	49,825	1,825	9062,185	20438,648
11,0	5	0,702	0,351	49,909	1,909	9320,303	20303,370
11,5	5	0,689	0,345	49,992	1,992	9563,239	20160,381
12,0	5	0,676	0,338	50,075	2,075	9791,065	20009,717
12,5	5	0,663	0,332	50,158	2,158	10003,849	19851,415
13,0	5	0,650	0,325	50,241	2,241	10201,661	19685,509
13,5	5	0,637	0,319	50,323	2,323	10384,567	19512,035
14,0	5	0,625	0,312	50,405	2,405	10552,635	19331,027
14,5	5	0,612	0,306	50,487	2,487	10705,931	19142,520
15,0	5	0,599	0,300	50,569	2,569	10844,520	18946,546
15,5	5	0,586	0,293	50,650	2,650	10968,467	18743,139
16,0	5	0,574	0,287	50,731	2,731	11077,835	18532,333
16,5	5	0,561	0,281	50,812	2,812	11172,687	18314,159
17,0	5	0,549	0,274	50,893	2,893	11253,086	18088,650
17,5	5	0,536	0,268	50,973	2,973	11319,092	17855,837
18,0	5	0,523	0,262	51,053	3,053	11370,768	17615,752
18,5	5	0,511	0,255	51,133	3,133	11408,173	17368,426
19,0	5	0,499	0,249	51,213	3,213	11431,366	17113,890
19,5	5	0,486	0,243	51,292	3,292	11440,406	16852,173
20,0	5	0,474	0,237	51,372	3,372	11435,352	16583,306
20,5	5	0,461	0,231	51,451	3,451	11416,260	16307,318

21,0	5	0,449	0,225	51,529	3,529	11383,188	16024,239
21,5	5	0,437	0,218	51,608	3,608	11336,191	15734,097
22,0	5	0,425	0,212	51,686	3,686	11275,326	15436,921
22,5	5	0,412	0,206	51,764	3,764	11200,647	15132,740
23,0	5	0,400	0,200	51,842	3,842	11112,208	14821,582
23,5	5	0,388	0,194	51,920	3,920	11010,064	14503,473
24,0	5	0,376	0,188	51,997	3,997	10894,267	14178,442
24,5	5	0,364	0,182	52,074	4,074	10764,870	13846,516
25,0	5	0,352	0,176	52,151	4,151	10621,926	13507,721

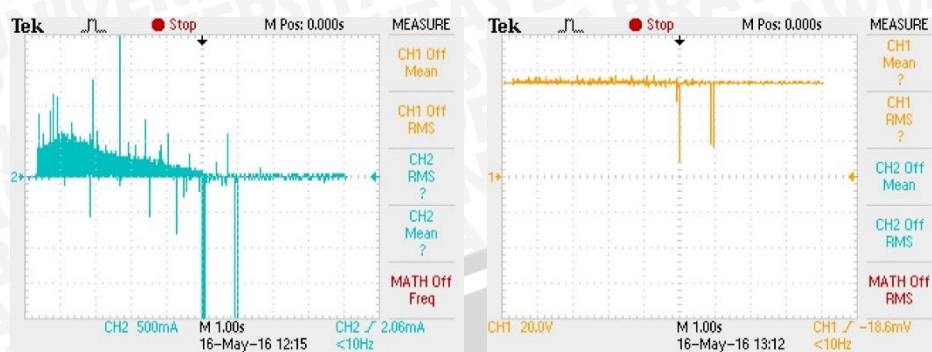
B. Nilai kapasitor kompensasi *ripple* tegangan keluaran.

$V_{emf,L-L}$ (V)	I_a (A)	D (Regent)	D (R-Plug)	V_o (V)	I_o (A)	C_{sw} (μ F) (Regent)	C_{sw} (μ F) (R-plug)
0,5	5	0,986	0,493	48,090	0,090	3,692	133,208
1,0	5	0,972	0,486	48,180	0,180	7,252	132,882
1,5	5	0,958	0,479	48,269	0,269	10,683	132,506
2,0	5	0,944	0,472	48,358	0,358	13,985	132,082
2,5	5	0,930	0,465	48,447	0,447	17,162	131,610
3,0	5	0,916	0,458	48,535	0,535	20,215	131,091
3,5	5	0,903	0,451	48,623	0,623	23,146	130,526
4,0	5	0,889	0,445	48,711	0,711	25,958	129,916
4,5	5	0,875	0,438	48,799	0,799	28,651	129,260
5,0	5	0,862	0,431	48,886	0,886	31,228	128,561
5,5	5	0,848	0,424	48,973	0,973	33,691	127,819
6,0	5	0,835	0,417	49,059	1,059	36,041	127,034
6,5	5	0,821	0,411	49,145	1,145	38,280	126,207
7,0	5	0,808	0,404	49,231	1,231	40,410	125,339
7,5	5	0,794	0,397	49,317	1,317	42,432	124,431
8,0	5	0,781	0,391	49,402	1,402	44,348	123,482
8,5	5	0,768	0,384	49,487	1,487	46,160	122,494
9,0	5	0,755	0,377	49,572	1,572	47,868	121,468
9,5	5	0,741	0,371	49,657	1,657	49,475	120,403
10,0	5	0,728	0,364	49,741	1,741	50,982	119,301
10,5	5	0,715	0,358	49,825	1,825	52,391	118,162
11,0	5	0,702	0,351	49,909	1,909	53,703	116,987
11,5	5	0,689	0,345	49,992	1,992	54,919	115,775
12,0	5	0,676	0,338	50,075	2,075	56,041	114,529
12,5	5	0,663	0,332	50,158	2,158	57,069	113,247
13,0	5	0,650	0,325	50,241	2,241	58,007	111,932
13,5	5	0,637	0,319	50,323	2,323	58,853	110,582
14,0	5	0,625	0,312	50,405	2,405	59,611	109,200
14,5	5	0,612	0,306	50,487	2,487	60,281	107,785
15,0	5	0,599	0,300	50,569	2,569	60,865	106,337
15,5	5	0,586	0,293	50,650	2,650	61,363	104,858
16,0	5	0,574	0,287	50,731	2,731	61,776	103,347
16,5	5	0,561	0,281	50,812	2,812	62,107	101,806

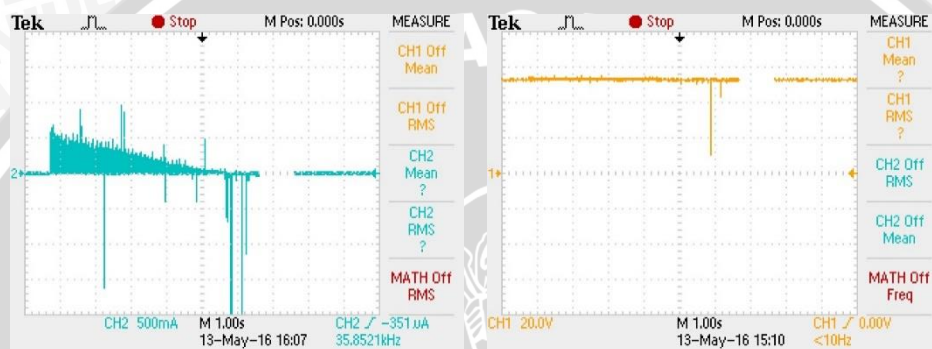
17,0	5	0,549	0,274	50,893	2,893	62,356	100,234
17,5	5	0,536	0,268	50,973	2,973	62,524	98,632
18,0	5	0,523	0,262	51,053	3,053	62,613	97,000
18,5	5	0,511	0,255	51,133	3,133	62,622	95,340
19,0	5	0,499	0,249	51,213	3,213	62,555	93,650
19,5	5	0,486	0,243	51,292	3,292	62,410	91,933
20,0	5	0,474	0,237	51,372	3,372	62,190	90,187
20,5	5	0,461	0,231	51,451	3,451	61,896	88,414
21,0	5	0,449	0,225	51,529	3,529	61,528	86,614
21,5	5	0,437	0,218	51,608	3,608	61,088	84,787
22,0	5	0,425	0,212	51,686	3,686	60,576	82,934
22,5	5	0,412	0,206	51,764	3,764	59,993	81,055
23,0	5	0,400	0,200	51,842	3,842	59,341	79,150
23,5	5	0,388	0,194	51,920	3,920	58,620	77,219
24,0	5	0,376	0,188	51,997	3,997	57,831	75,264
24,5	5	0,364	0,182	52,074	4,074	56,974	73,284
25,0	5	0,352	0,176	52,151	4,151	56,052	71,280



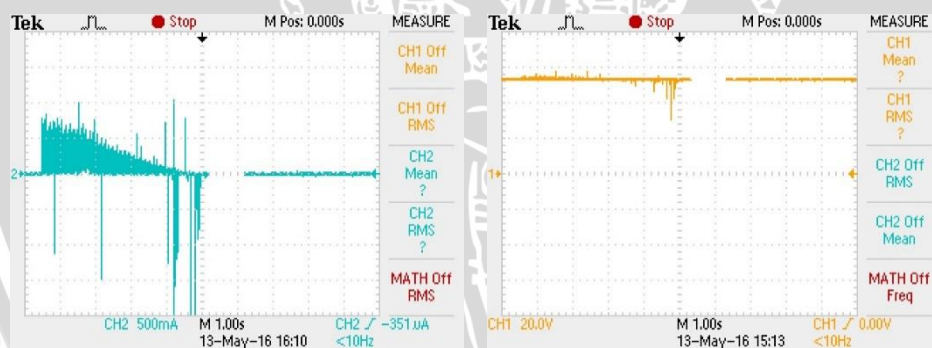
Lampiran 4: Gelombang arus dan tegangan masukan baterai saat pengereman.



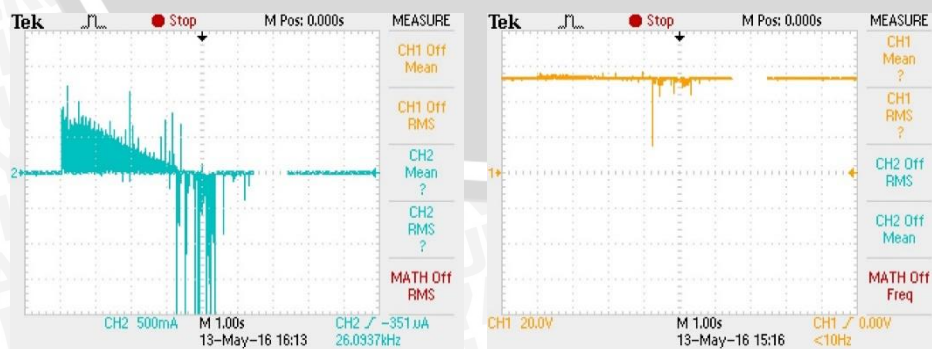
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 30 km/jam, arus pengereman 1 A.



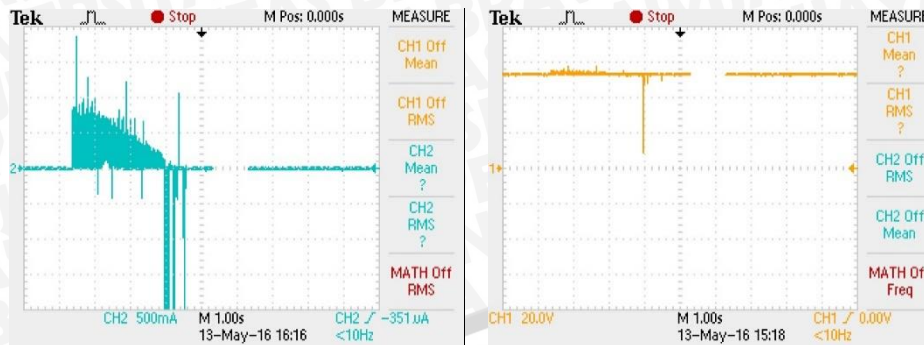
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 30 km/jam, arus pengereman 2 A.



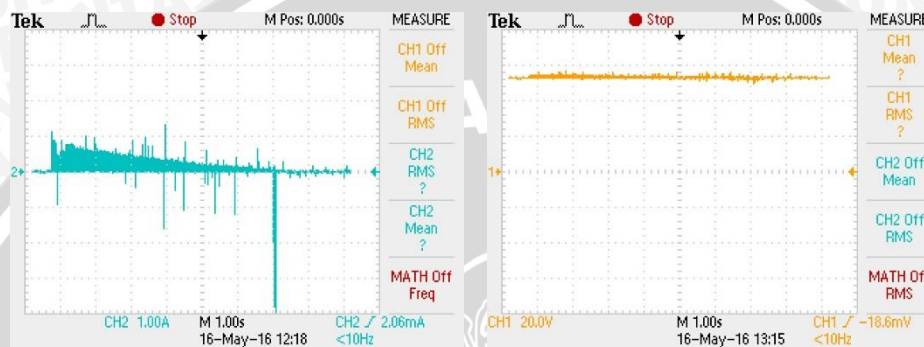
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 30 km/jam, arus pengereman 3 A.



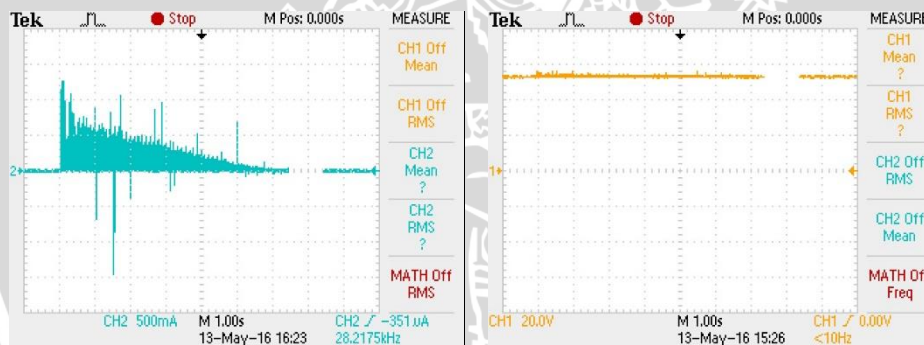
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 30 km/jam, arus pengereman 4 A.



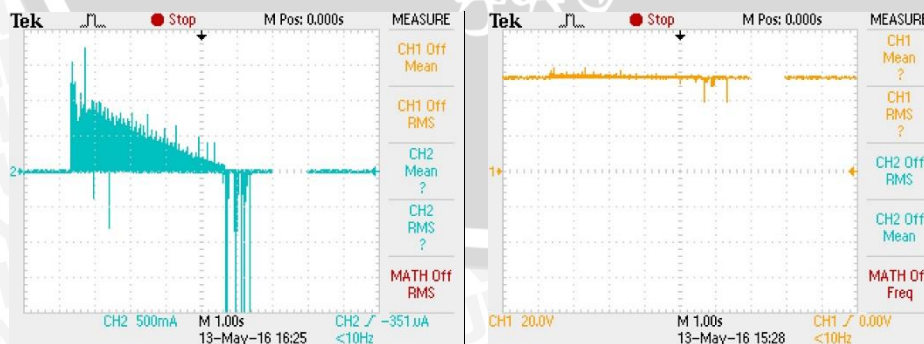
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 30 km/jam, arus pengereman 5 A.



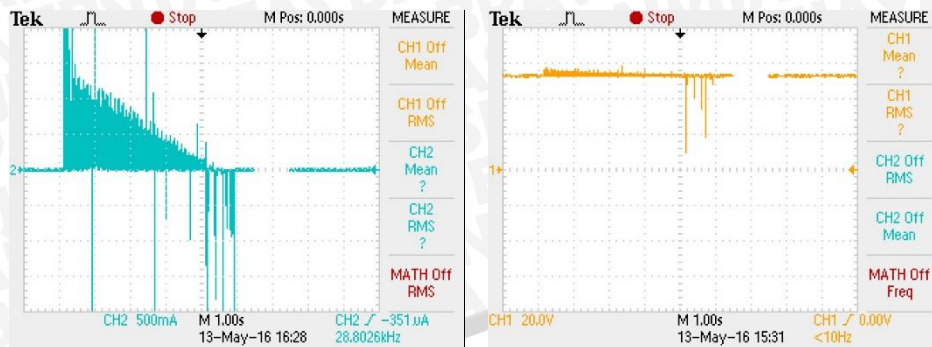
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 40 km/jam, arus pengereman 1 A.



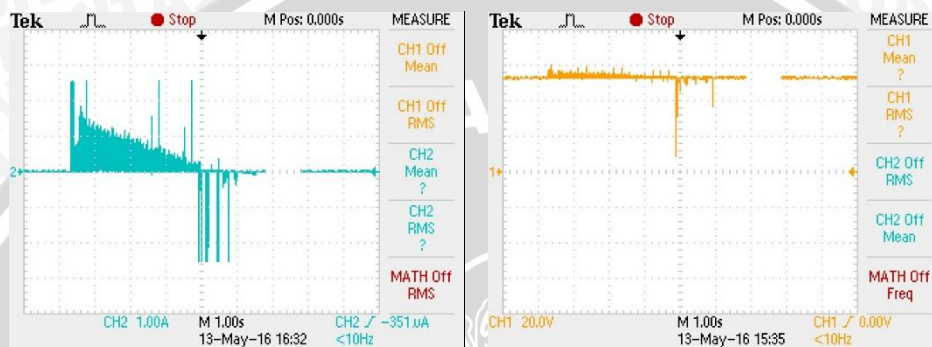
Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 40 km/jam, arus pengereman 2 A.



Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 40 km/jam, arus pengereman 3 A.



Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 40 km/jam, arus pengereman 4 A.

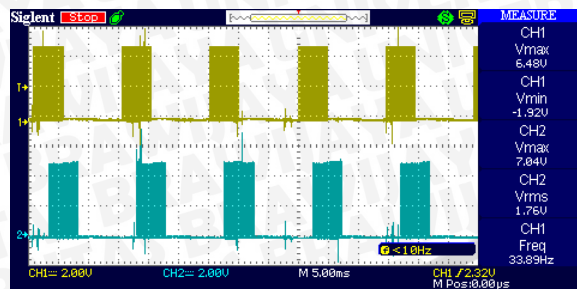


Gelombang arus (kiri) dan tegangan (kanan) baterai pada proses pengereman regeneratif, kecepatan awal 40 km/jam, arus pengereman 5 A.

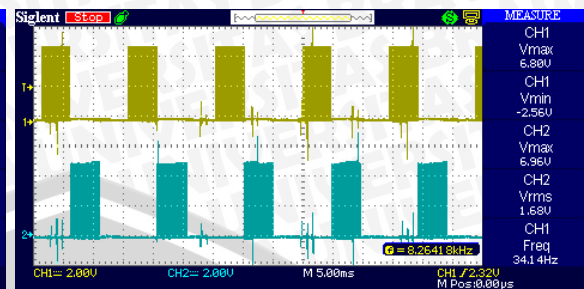


Lampiran 5: Gelombang pensaklaran *Inverter*, *Hall sensors*, *Back-EMF*, V_{AB} , I_A .

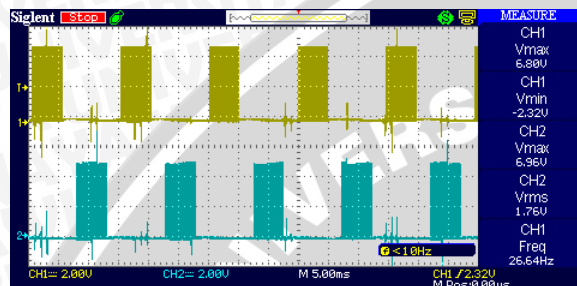
A. Gelombang pensaklaran VSI pada mode regeneratif-plugging.



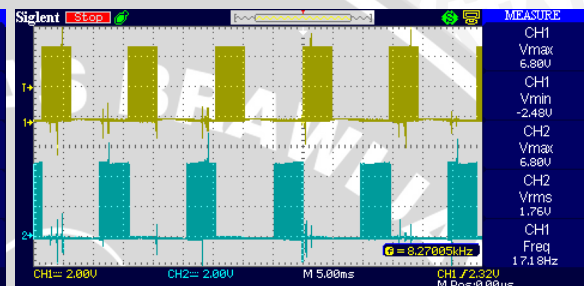
S1 (Atas) -S2 (Bawah)



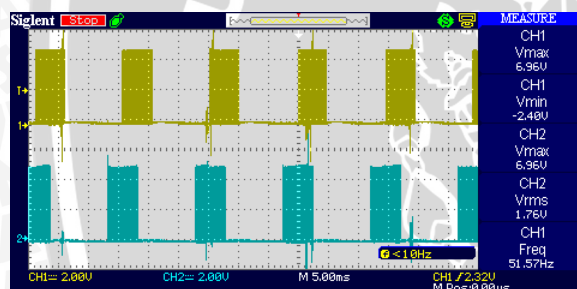
S1 (Atas) -S3 (Bawah)



S1 (Atas) -S4 (Bawah)

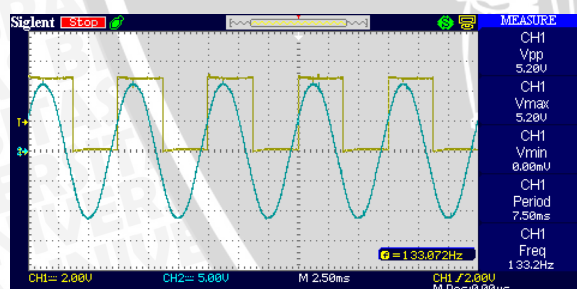
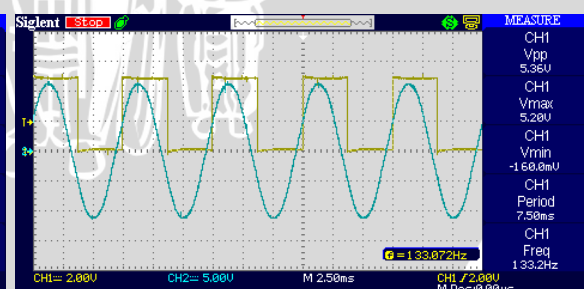
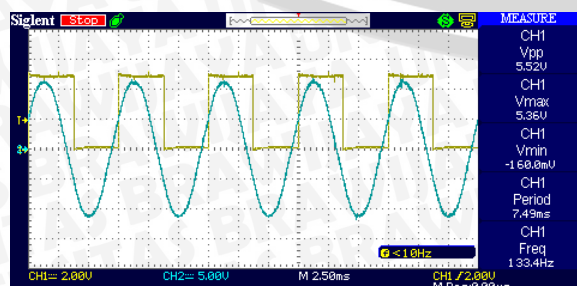
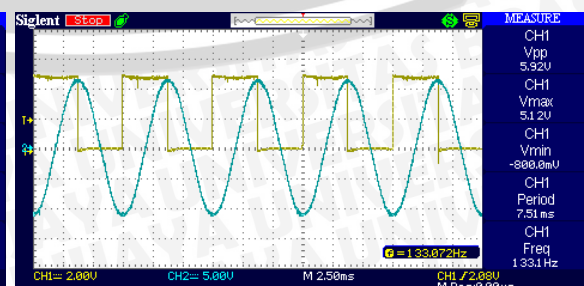


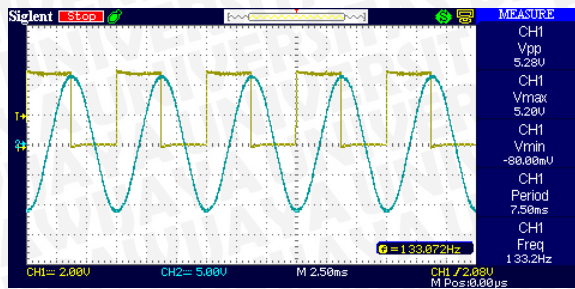
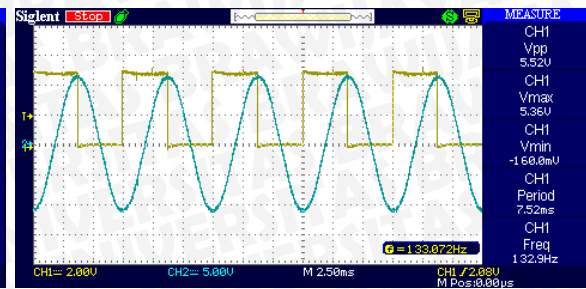
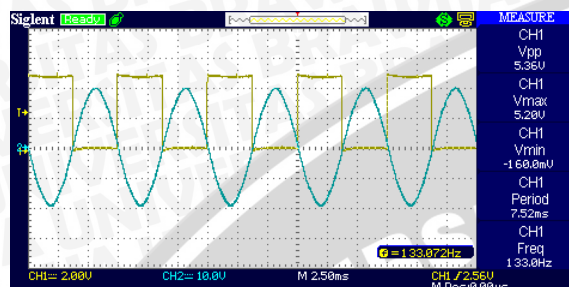
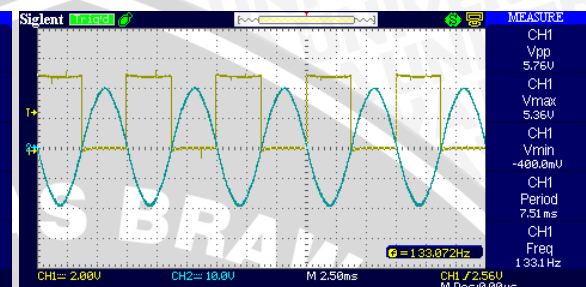
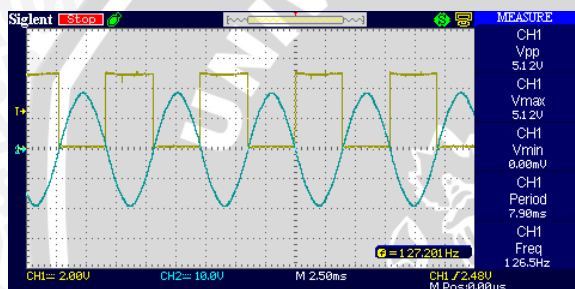
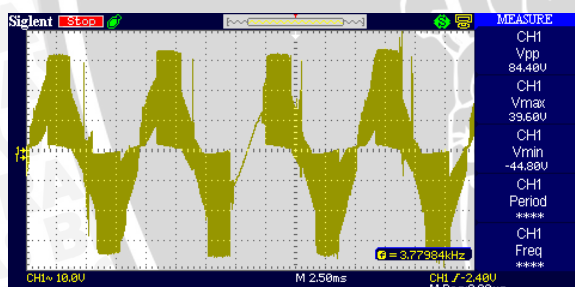
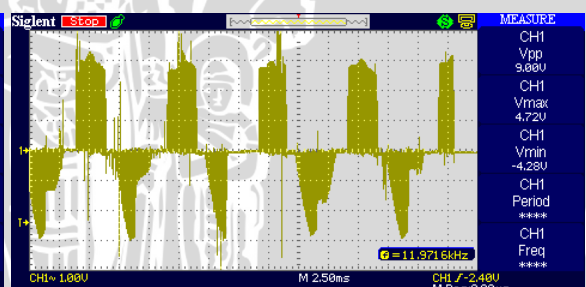
S1 (Atas) -S5 (Bawah)



S1 (Atas) -S6 (Bawah)

B. Gelombang *Hall sensors* dan *Back-EMF*

Hall sensor 1 (kuning) dan V_A (biru)Hall sensor 2 (kuning) dan V_B (biru)Hall sensor 3 (kuning) dan V_C (biru)Hall sensor 1 (kuning) dan V_B (biru)

Hall sensor 2 (kuning) dan V_c (biru)Hall sensor 3 (kuning) dan V_A (biru)Hall Sensor 2 (Kuning) dan V_{AB} (Biru)Hall Sensor 3 (Kuning) dan V_{BC} (Biru)Hall Sensor 1 (Kuning) dan V_{CA} (Biru) V_{AB} saat mode regeneratif

Arus fasa A saat mode regeneratif

Lampiran 6: Data numerik arus dan tegangan masukan baterai saat pengereman elektrik.

Data numerik arus dan tegangan masukan baterai VRLA 12V 100Ahx4 (seri) dengan setpoint 5A dan kecepatan awal 30km/jam.

No	Waktu (detik)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (watt)
1	1,396	0,82	55,2	45,264
2	1,400	0,42	55,2	23,184
3	1,404	0,78	53,6	41,808
4	1,408	0,04	53,6	2,144
5	1,412	0,02	53,6	1,072
6	1,416	0,36	55,2	19,872
7	1,420	0,86	53,6	46,096
8	1,424	0,46	53,6	24,656
9	1,428	0,84	52,8	44,352
10	1,432	0,00	54,4	0,000
11	1,436	0,82	53,6	43,952
12	1,440	0,76	55,2	41,952
13	1,444	0,50	53,6	26,800
14	1,448	0,66	53,6	35,376
15	1,452	0,00	55,2	0,000
16	1,456	0,86	54,4	46,784
17	1,460	0,58	54,4	31,552
18	1,464	0,86	54,4	46,784
19	1,468	0,10	52,8	5,280
20	1,472	0,00	53,6	0,000
21	1,476	0,60	54,4	32,640
22	1,480	0,96	53,6	51,456
23	1,484	1,86	55,2	102,672
24	1,488	0,76	53,6	40,736
25	1,492	0,00	53,6	0,000
26	1,496	0,74	53,6	39,664
27	1,500	0,60	54,4	32,640
28	1,504	0,76	52,8	40,128
29	1,508	0,60	53,6	32,160
30	1,512	0,00	52,8	0,000
31	1,516	0,68	54,4	36,992
32	1,520	0,66	53,6	35,376
33	1,524	0,70	54,4	38,080
34	1,528	0,40	53,6	21,440
35	1,532	0,00	53,6	0,000
36	1,536	0,56	54,4	30,464
37	1,540	0,78	54,4	42,432
38	1,544	0,32	53,6	17,152

39	1,548	0,76	53,6	40,736
40	1,552	0,02	54,4	1,088
41	1,556	0,72	55,2	39,744
42	1,560	0,48	55,2	26,496
43	1,564	0,76	54,4	41,344
44	1,568	0,08	53,6	4,288
45	1,572	0,00	53,6	0,000
46	1,576	0,52	53,6	27,872
47	1,580	0,90	54,4	48,960
48	1,584	0,26	54,4	14,144
49	1,588	0,90	53,6	48,240
50	1,592	0,02	53,6	1,072
51	1,596	0,26	54,4	14,144
52	1,600	0,42	54,4	22,848
53	1,604	0,72	53,6	38,592
54	1,608	0,04	52,8	2,112
55	1,612	-0,02	52,8	-1,056
56	1,616	0,36	54,4	19,584
57	1,620	0,74	53,6	39,664
58	1,624	0,20	54,4	10,880
59	1,628	0,74	52,8	39,072
60	1,632	0,00	53,6	0,000
61	1,636	0,74	53,6	39,664
62	1,640	0,48	54,4	26,112
63	1,644	0,92	53,6	49,312
64	1,648	0,04	52,8	2,112
65	1,652	0,00	52,8	0,000
66	1,656	0,44	54,4	23,936
67	1,660	0,86	53,6	46,096
68	1,664	0,24	55,2	13,248
69	1,668	0,90	53,6	48,240
70	1,672	0,02	53,6	1,072
71	1,676	0,90	54,4	48,960
72	1,680	0,54	54,4	29,376
73	1,684	0,92	52,8	48,576
74	1,688	0,02	52,8	1,056
75	1,692	0,00	52,8	0,000
76	1,696	0,58	54,4	31,552
77	1,700	0,98	53,6	52,528
78	1,704	0,12	55,2	6,624

79	1,708	0,76	53,6	40,736
80	1,712	0,02	53,6	1,072
81	1,716	0,74	54,4	40,256
82	1,720	0,44	54,4	23,936
83	1,724	0,72	54,4	39,168
84	1,728	0,04	52,8	2,112
85	1,732	0,00	53,6	0,000
86	1,736	0,40	54,4	21,760
87	1,740	0,70	55,2	38,640
88	1,744	0,22	53,6	11,792
89	1,748	0,72	53,6	38,592
90	1,752	0,02	53,6	1,072
91	1,756	0,76	54,4	41,344
92	1,760	0,50	53,6	26,800
93	1,764	0,76	55,2	41,952
94	1,768	0,30	52,8	15,840
95	1,772	0,00	54,4	0,000
96	1,776	0,62	53,6	33,232
97	1,780	0,78	56,0	43,680
98	1,784	0,74	53,6	39,664
99	1,788	0,78	53,6	41,808
100	1,792	0,02	53,6	1,072
101	1,796	0,84	54,4	45,696
102	1,800	0,98	53,6	52,528
103	1,804	0,70	54,4	38,080
104	1,808	0,94	53,6	50,384
105	1,812	0,02	53,6	1,072
106	1,816	1,28	54,4	69,632
107	1,820	0,42	54,4	22,848
108	1,824	0,76	53,6	40,736
109	1,828	0,02	52,8	1,056
110	1,832	0,02	53,6	1,072
111	1,836	0,36	54,4	19,584
112	1,840	0,76	54,4	41,344
113	1,844	0,28	53,6	15,008
114	1,848	0,74	53,6	39,664
115	1,852	0,04	52,8	2,112
116	1,856	0,70	54,4	38,080
117	1,860	0,70	53,6	37,520
118	1,864	0,70	54,4	38,080
119	1,868	0,78	52,8	41,184
120	1,872	0,00	52,8	0,000
121	1,876	0,76	53,6	40,736
122	1,880	0,42	54,4	22,848
123	1,884	0,80	53,6	42,880

124	1,888	0,02	52,8	1,056
125	1,892	-0,02	57,6	-1,152
126	1,896	0,40	54,4	21,760
127	1,900	0,86	54,4	46,784
128	1,904	0,38	53,6	20,368
129	1,908	0,86	54,4	46,784
130	1,912	0,04	52,8	2,112
131	1,916	0,86	55,2	47,472
132	1,920	0,94	53,6	50,384
133	1,924	0,64	54,4	34,816
134	1,928	0,74	53,6	39,664
135	1,932	0,00	52,8	0,000
136	1,936	0,72	54,4	39,168
137	1,940	0,40	53,6	21,440
138	1,944	0,60	54,4	32,640
139	1,948	0,12	52,8	6,336
140	1,952	-0,02	52,8	-1,056
141	1,956	0,50	53,6	26,800
142	1,960	0,70	54,4	38,080
143	1,964	0,78	52,8	41,184
144	1,968	0,42	52,8	22,176
145	1,972	0,00	52,8	0,000
146	1,976	0,36	54,4	19,584
147	1,980	0,76	54,4	41,344
148	1,984	-0,24	54,4	13,056
149	1,988	0,74	53,6	39,664
150	1,992	0,04	52,8	2,112
151	1,996	0,64	55,2	35,328
152	2,000	0,74	54,4	40,256
153	2,004	0,26	53,6	13,936
154	2,008	0,78	53,6	41,808
155	2,012	0,02	52,8	1,056
156	2,016	0,88	53,6	47,168
157	2,020	0,56	54,4	30,464
158	2,024	0,72	54,4	39,168
159	2,028	0,18	52,8	9,504
160	2,032	-0,02	52,8	-1,056
161	2,036	1,00	53,6	53,600
162	2,040	0,62	54,4	33,728
163	2,044	0,72	53,6	38,592
164	2,048	0,02	53,6	1,072
165	2,052	0,00	53,6	0,000
166	2,056	0,30	53,6	16,080
167	2,060	0,74	54,4	40,256
168	2,064	0,42	52,8	22,176

169	2,068	0,64	54,4	34,816
170	2,072	0,06	52,8	3,168
171	2,076	0,36	54,4	19,584
172	2,080	0,76	53,6	40,736
173	2,084	0,28	54,4	15,232
174	2,088	0,68	54,4	36,992
175	2,092	0,06	52,8	3,168
176	2,096	0,62	54,4	33,728
177	2,100	0,76	53,6	40,736
178	2,104	0,54	55,2	29,808
179	2,108	0,74	52,8	39,072
180	2,112	0,02	52,8	1,056
181	2,116	-0,36	54,4	-19,584
182	2,120	0,50	53,6	26,800
183	2,124	0,72	54,4	39,168
184	2,128	0,80	52,8	42,240
185	2,132	0,00	52,8	0,000
186	2,136	0,80	53,6	42,880
187	2,140	0,56	54,4	30,464
188	2,144	0,80	54,4	43,520
189	2,148	0,22	53,6	11,792
190	2,152	0,00	52,8	0,000
191	2,156	0,62	53,6	33,232
192	2,160	0,40	53,6	21,440
193	2,164	0,70	53,6	37,520
194	2,168	0,02	52,8	1,056
195	2,172	0,00	52,8	0,000
196	2,176	0,44	53,6	23,584
197	2,180	0,64	54,4	34,816
198	2,184	0,70	52,8	36,960
199	2,188	0,02	53,6	1,072
200	2,192	0,00	52,8	0,000
201	2,196	0,24	53,6	12,864
202	2,200	0,66	54,4	35,904
203	2,204	0,72	53,6	38,592
204	2,208	0,22	53,6	11,792
205	2,212	0,02	52,8	1,056
206	2,216	0,22	54,4	11,968
207	2,220	0,74	55,2	40,848
208	2,224	0,54	52,8	28,512
209	2,228	0,68	53,6	36,448
210	2,232	0,04	52,8	2,112
211	2,236	0,30	54,4	16,320
212	2,240	0,68	53,6	36,448
213	2,244	0,40	52,8	21,120

214	2,248	0,74	53,6	39,664
215	2,252	0,06	53,6	3,216
216	2,256	0,28	54,4	15,232
217	2,260	0,60	53,6	32,160
218	2,264	0,30	53,6	16,080
219	2,268	0,62	54,4	33,728
220	2,272	0,12	52,8	6,336
221	2,276	0,18	54,4	9,792
222	2,280	0,70	54,4	38,080
223	2,284	0,28	53,6	15,008
224	2,288	0,62	54,4	33,728
225	2,292	0,14	52,8	7,392
226	2,296	0,18	54,4	9,792
227	2,300	0,70	54,4	38,080
228	2,304	0,28	52,8	14,784
229	2,308	0,64	55,2	35,328
230	2,312	0,10	52,8	5,280
231	2,316	0,24	54,4	13,056
232	2,320	0,72	55,2	39,744
233	2,324	0,30	54,4	16,320
234	2,328	0,64	55,2	35,328
235	2,332	0,12	53,6	6,432
236	2,336	0,16	53,6	8,576
237	2,340	0,62	53,6	33,232
238	2,344	0,34	53,6	18,224
239	2,348	0,64	53,6	34,304
240	2,352	0,12	52,8	6,336
241	2,356	0,22	53,6	11,792
242	2,360	0,70	53,6	37,520
243	2,364	0,40	52,8	21,120
244	2,368	0,64	53,6	34,304
245	2,372	0,10	53,6	5,360
246	2,376	0,12	53,6	6,432
247	2,380	0,62	53,6	33,232
248	2,384	0,40	52,8	21,120
249	2,388	0,48	53,6	25,728
250	2,392	0,08	52,8	4,224
251	2,396	0,10	54,4	5,440
252	2,400	0,68	54,4	36,992
253	2,404	0,66	52,8	34,848
254	2,408	0,10	53,6	5,360
255	2,412	0,00	52,8	0,000
256	2,416	0,10	52,8	5,280
257	2,420	0,64	54,4	34,816
258	2,424	0,64	53,6	34,304

259	2,428	0,00	53,6	0,000
260	2,432	0,02	52,8	1,056
261	2,436	0,24	53,6	12,864
262	2,440	0,54	55,2	29,808
263	2,444	0,70	53,6	37,520
264	2,448	0,04	52,8	2,112
265	2,452	0,00	52,8	0,000
266	2,456	0,54	53,6	28,944
267	2,460	0,40	53,6	21,440
268	2,464	0,64	53,6	34,304
269	2,468	0,26	52,8	13,728
270	2,472	0,02	52,8	1,056
271	2,476	0,64	53,6	34,304
272	2,480	-0,42	53,6	-22,512
273	2,484	0,50	54,4	27,200
274	2,488	0,56	53,6	30,016
275	2,492	0,00	52,8	0,000
276	2,496	0,28	54,4	15,232
277	2,500	0,44	53,6	23,584
278	2,504	0,46	54,4	25,024
279	2,508	0,60	54,4	32,640
280	2,512	0,06	52,8	3,168
281	2,516	0,26	53,6	13,936
282	2,520	0,70	53,6	37,520
283	2,524	0,26	53,6	13,936
284	2,528	0,62	54,4	33,728
285	2,532	0,18	53,6	9,648
286	2,536	0,04	54,4	2,176
287	2,540	0,62	54,4	33,728
288	2,544	0,36	52,8	19,008
289	2,548	0,54	53,6	28,944
290	2,552	0,12	53,6	6,432
291	2,556	0,04	53,6	2,144
292	2,560	0,62	53,6	33,232
293	2,564	0,64	53,6	34,304
294	2,568	0,02	53,6	1,072
295	2,572	0,00	52,8	0,000
296	2,576	0,46	53,6	24,656
297	2,580	0,42	53,6	22,512
298	2,584	0,62	54,4	33,728
299	2,588	0,30	52,8	15,840
300	2,592	0,00	52,8	0,000
301	2,596	0,26	53,6	13,936
302	2,600	0,32	53,6	17,152
303	2,604	0,52	53,6	27,872

304	2,608	0,56	53,6	30,016
305	2,612	0,04	52,8	2,112
306	2,616	0,12	53,6	6,432
307	2,620	0,58	53,6	31,088
308	2,624	0,24	53,6	12,864
309	2,628	0,52	54,4	28,288
310	2,632	0,20	53,6	10,720
311	2,636	0,02	53,6	1,072
312	2,640	0,70	54,4	38,080
313	2,644	0,62	53,6	33,232
314	2,648	0,02	54,4	1,088
315	2,652	0,04	52,8	2,112
316	2,656	-0,02	53,6	-1,072
317	2,660	0,42	53,6	22,512
318	2,664	0,56	57,6	32,256
319	2,668	0,16	52,8	8,448
320	2,672	0,00	52,8	0,000
321	2,676	0,26	54,4	14,144
322	2,680	0,38	52,8	20,064
323	2,684	0,64	54,4	34,816
324	2,688	0,76	54,4	41,344
325	2,692	0,04	52,8	2,112
326	2,696	0,14	53,6	7,504
327	2,700	0,82	54,4	44,608
328	2,704	0,24	53,6	12,864
329	2,708	0,48	53,6	25,728
330	2,712	0,32	53,6	17,152
331	2,716	0,00	53,6	0,000
332	2,720	0,48	53,6	25,728
333	2,724	0,54	53,6	28,944
334	2,728	0,02	53,6	1,072
335	2,732	0,02	52,8	1,056
336	2,736	0,08	53,6	4,288
337	2,740	0,26	53,6	13,936
338	2,744	0,46	54,4	25,024
339	2,748	0,50	52,8	26,400
340	2,752	0,02	52,8	1,056
341	2,756	0,00	53,6	0,000
342	2,760	0,68	53,6	36,448
343	2,764	0,24	53,6	12,864
344	2,768	0,50	54,4	27,200
345	2,772	0,48	53,6	25,728
346	2,776	0,02	54,4	1,088
347	2,780	0,58	53,6	31,088
348	2,784	0,64	52,8	33,792

349	2,788	0,02	53,6	1,072
350	2,792	0,02	52,8	1,056
351	2,796	0,02	53,6	1,072
352	2,800	0,30	53,6	16,080
353	2,804	0,62	53,6	33,232
354	2,808	0,72	54,4	39,168
355	2,812	0,04	52,8	2,112
356	2,816	-0,02	54,4	-1,088
357	2,820	0,58	53,6	31,088
358	2,824	0,28	53,6	15,008
359	2,828	0,34	53,6	18,224
360	2,832	0,26	53,6	13,936
361	2,836	0,00	53,6	0,000
362	2,840	0,34	53,6	18,224
363	2,844	0,42	53,6	22,512
364	2,848	0,30	52,8	15,840
365	2,852	0,02	52,8	1,056
366	2,856	-0,02	54,4	-1,088
367	2,860	0,50	53,6	26,800
368	2,864	0,24	53,6	12,864
369	2,868	0,48	53,6	25,728
370	2,872	0,34	52,8	17,952
371	2,876	0,02	53,6	1,072
372	2,880	0,46	54,4	25,024
373	2,884	0,58	52,8	30,624
374	2,888	0,04	53,6	2,144
375	2,892	0,04	52,8	2,112
376	2,896	-0,02	54,4	-1,088
377	2,900	0,34	52,8	17,952
378	2,904	1,22	54,4	66,368
379	2,908	0,56	53,6	30,016
380	2,912	0,18	52,8	9,504
381	2,916	0,00	53,6	0,000
382	2,920	0,54	53,6	28,944
383	2,924	0,22	53,6	11,792
384	2,928	0,08	54,4	4,352
385	2,932	0,06	52,8	3,168
386	2,936	-0,02	52,8	-1,056
387	2,940	0,24	53,6	12,864
388	2,944	0,40	53,6	21,440
389	2,948	0,54	53,6	28,944
390	2,952	0,04	52,8	2,112
391	2,956	0,00	53,6	0,000
392	2,960	0,44	53,6	23,584
393	2,964	0,30	52,8	15,840

394	2,968	0,00	53,6	0,000
395	2,972	0,06	53,6	3,216
396	2,976	0,00	53,6	0,000
397	2,980	0,24	53,6	12,864
398	2,984	0,40	53,6	21,440
399	2,988	0,46	53,6	24,656
400	2,992	0,02	52,8	1,056
401	2,996	-0,02	53,6	-1,072
402	3,000	0,46	53,6	24,656
403	3,004	0,30	53,6	16,080
404	3,008	0,00	53,6	0,000
405	3,012	0,06	52,8	3,168
406	3,016	-0,02	53,6	-1,072
407	3,020	0,32	53,6	17,152
408	3,024	0,56	53,6	30,016
409	3,028	0,70	53,6	37,520
410	3,032	0,08	52,8	4,224
411	3,036	0,00	53,6	0,000
412	3,040	0,46	53,6	24,656
413	3,044	0,46	53,6	24,656
414	3,048	0,02	53,6	1,072
415	3,052	0,10	53,6	5,360
416	3,056	-0,02	53,6	-1,072
417	3,060	0,24	53,6	12,864
418	3,064	-0,34	53,6	18,224
419	3,068	0,36	53,6	19,296
420	3,072	0,40	53,6	21,440
421	3,076	0,00	53,6	0,000
422	3,080	0,40	53,6	21,440
423	3,084	0,44	53,6	23,584
424	3,088	0,10	53,6	5,360
425	3,092	0,02	52,8	1,056
426	3,096	0,00	53,6	0,000
427	3,100	0,40	53,6	21,440
428	3,104	0,24	53,6	12,864
429	3,108	0,36	53,6	19,296
430	3,112	0,46	52,8	24,288
431	3,116	0,00	53,6	0,000
432	3,120	0,36	53,6	19,296
433	3,124	0,38	53,6	20,368
434	3,128	0,32	53,6	17,152
435	3,132	0,00	52,8	0,000
436	3,136	0,00	53,6	0,000
437	3,140	0,70	53,6	37,520
438	3,144	0,14	53,6	7,504

439	3,148	0,10	53,6	5,360
440	3,152	0,12	52,8	6,336
441	3,156	0,00	53,6	0,000
442	3,160	0,20	52,8	10,560
443	3,164	0,34	53,6	18,224
444	3,168	0,32	53,6	17,152
445	3,172	0,34	52,8	17,952
446	3,176	0,00	53,6	0,000
447	3,180	0,34	53,6	18,224
448	3,184	0,46	53,6	24,656
449	3,188	0,12	52,8	6,336
450	3,192	0,00	53,6	0,000
451	3,196	-0,02	53,6	-1,072
452	3,200	0,36	53,6	19,296
453	3,204	0,20	52,8	10,560
454	3,208	0,32	53,6	17,152
455	3,212	0,22	52,8	11,616
456	3,216	0,00	53,6	0,000
457	3,220	0,20	53,6	10,720
458	3,224	0,34	53,6	18,224
459	3,228	0,38	52,8	20,064
460	3,232	0,20	52,8	10,560
461	3,236	-0,02	53,6	-1,072
462	3,240	0,22	53,6	11,792
463	3,244	0,42	53,6	22,512
464	3,248	0,12	52,8	6,336
465	3,252	0,00	52,8	0,000
466	3,256	-0,02	53,6	-1,072
467	3,260	0,38	53,6	20,368
468	3,264	0,18	53,6	9,648
469	3,268	0,20	53,6	10,720
470	3,272	0,20	53,6	10,720
471	3,276	-0,02	53,6	-1,072
472	3,280	0,18	52,8	9,504
473	3,284	0,30	53,6	16,080
474	3,288	0,26	53,6	13,936
475	3,292	0,34	52,8	17,952
476	3,296	-0,02	53,6	-1,072
477	3,300	0,36	53,6	19,296
478	3,304	0,30	53,6	16,080
479	3,308	0,32	53,6	17,152
480	3,312	0,00	52,8	0,000
481	3,316	0,00	53,6	0,000
482	3,320	0,32	53,6	17,152
483	3,324	0,32	53,6	17,152

484	3,328	0,10	52,0	5,200
485	3,332	0,16	52,8	8,448
486	3,336	-0,02	53,6	-1,072
487	3,340	0,34	53,6	18,224
488	3,344	0,20	53,6	10,720
489	3,348	0,32	53,6	17,152
490	3,352	-0,42	52,8	-22,176
491	3,356	0,00	52,8	0,000
492	3,360	0,24	53,6	12,864
493	3,364	0,36	53,6	19,296
494	3,368	0,66	53,6	35,376
495	3,372	0,30	52,8	15,840
496	3,376	-0,02	53,6	-1,072
497	3,380	0,38	53,6	20,368
498	3,384	0,26	53,6	13,936
499	3,388	0,30	52,8	15,840
500	3,392	0,00	52,8	0,000
501	3,396	0,00	53,6	0,000
502	3,400	0,28	53,6	15,008
503	3,404	0,32	52,8	16,896
504	3,408	0,10	52,8	5,280
505	3,412	0,16	52,8	8,448
506	3,416	0,00	53,6	0,000
507	3,420	0,30	53,6	16,080
508	3,424	-0,16	52,8	8,448
509	3,428	0,20	53,6	10,720
510	3,432	0,22	52,8	11,616
511	3,436	0,00	55,2	0,000
512	3,440	0,18	53,6	9,648
513	3,444	0,16	53,6	8,576
514	3,448	0,28	53,6	15,008
515	3,452	0,34	52,8	17,952
516	3,456	0,00	52,8	0,000
517	3,460	0,20	53,6	10,720
518	3,464	0,38	53,6	20,368
519	3,468	0,34	53,6	18,224
520	3,472	0,28	53,6	15,008
521	3,476	0,00	52,8	0,000
522	3,480	0,32	53,6	17,152
523	3,484	0,22	53,6	11,792
524	3,488	0,22	52,8	11,616
525	3,492	0,02	53,6	1,072
526	3,496	0,00	53,6	0,000
527	3,500	0,34	53,6	18,224
528	3,504	0,30	53,6	16,080

529	3,508	0,06	53,6	3,216
530	3,512	0,02	52,8	1,056
531	3,516	0,00	53,6	0,000
532	3,520	0,32	53,6	17,152
533	3,524	0,26	53,6	13,936
534	3,528	0,04	52,8	2,112
535	3,532	0,26	52,0	13,520
536	3,536	0,00	53,6	0,000
537	3,540	0,26	52,8	13,728
538	3,544	0,14	52,0	7,280
539	3,548	0,04	53,6	2,144
540	3,552	0,22	52,8	11,616
541	3,556	0,02	53,6	1,072
542	3,560	0,20	52,8	10,560
543	3,564	0,12	53,6	6,432
544	3,568	0,24	53,6	12,864
545	3,572	0,20	52,8	10,560
546	3,576	0,00	53,6	0,000
547	3,580	0,16	52,8	8,448
548	3,584	0,14	53,6	7,504
549	3,588	0,30	53,6	16,080
550	3,592	0,02	52,8	1,056
551	3,596	0,02	52,8	1,056
552	3,600	0,10	53,6	5,360
553	3,604	0,20	53,6	10,720
554	3,608	0,20	53,6	10,720
555	3,612	0,22	52,8	11,616
556	3,616	0,00	52,8	0,000
557	3,620	0,12	53,6	6,432
558	3,624	0,22	53,6	11,792
559	3,628	0,22	53,6	11,792
560	3,632	0,24	52,8	12,672
561	3,636	0,02	52,8	1,056
562	3,640	0,14	53,6	7,504
563	3,644	0,22	53,6	11,792
564	3,648	0,28	52,8	14,784
565	3,652	0,14	52,8	7,392
566	3,656	0,00	52,0	0,000
567	3,660	0,24	52,0	12,480
568	3,664	0,24	53,6	12,864
569	3,668	0,22	53,6	11,792
570	3,672	0,04	52,8	2,112
571	3,676	0,00	52,8	0,000
572	3,680	0,24	53,6	12,864
573	3,684	0,20	53,6	10,720

574	3,688	0,24	52,8	12,672
575	3,692	0,02	52,8	1,056
576	3,696	0,00	53,6	0,000
577	3,700	0,26	52,8	13,728
578	3,704	0,18	53,6	9,648
579	3,708	0,18	53,6	9,648
580	3,712	0,02	52,8	1,056
581	3,716	0,00	53,6	0,000
582	3,720	0,18	53,6	9,648
583	3,724	0,20	53,6	10,720
584	3,728	0,18	53,6	9,648
585	3,732	0,02	52,8	1,056
586	3,736	0,00	53,6	0,000
587	3,740	0,20	53,6	10,720
588	3,744	0,22	53,6	11,792
589	3,748	0,20	52,8	10,560
590	3,752	0,02	52,8	1,056
591	3,756	0,00	53,6	0,000
592	3,760	0,20	52,8	10,560
593	3,764	0,24	53,6	12,864
594	3,768	0,20	53,6	10,720
595	3,772	0,00	52,8	0,000
596	3,776	0,00	52,8	0,000
597	3,780	0,20	52,8	10,560
598	3,784	0,26	52,8	13,728
599	3,788	0,20	52,8	10,560
600	3,792	0,00	53,6	0,000
601	3,796	-0,02	53,6	-1,072
602	3,800	0,24	52,8	12,672
603	3,804	0,24	53,6	12,864
604	3,808	0,20	52,8	10,560
605	3,812	0,08	52,8	4,224
606	3,816	0,00	52,8	0,000
607	3,820	0,12	53,6	6,432
608	3,824	0,14	53,6	7,504
609	3,828	0,14	53,6	7,504
610	3,832	0,00	53,6	0,000
611	3,836	0,00	53,6	0,000
612	3,840	0,16	53,6	8,576
613	3,844	0,14	53,6	7,504
614	3,848	0,16	52,8	8,448
615	3,852	0,04	52,8	2,112
616	3,856	0,00	52,8	0,000
617	3,860	0,16	53,6	8,576
618	3,864	0,18	52,8	9,504

619	3,868	0,22	52,0	11,440
620	3,872	0,14	52,8	7,392
621	3,876	0,00	52,8	0,000
622	3,880	0,10	53,6	5,360
623	3,884	0,16	52,8	8,448
624	3,888	0,16	53,6	8,576
625	3,892	0,16	52,8	8,448
626	3,896	0,02	53,6	1,072
627	3,900	0,08	52,8	4,224
628	3,904	0,20	52,8	10,560
629	3,908	0,18	53,6	9,648
630	3,912	0,12	53,6	6,432
631	3,916	0,00	52,8	0,000
632	3,920	0,10	53,6	5,360
633	3,924	0,00	53,6	0,000
634	3,928	0,12	52,8	6,336
635	3,932	0,14	53,6	7,504
636	3,936	0,00	52,8	0,000
637	3,940	0,04	52,8	2,112
638	3,944	0,04	52,8	2,112
639	3,948	0,14	52,8	7,392
640	3,952	0,12	52,8	6,336
641	3,956	0,00	52,8	0,000
642	3,960	0,12	53,6	6,432
643	3,964	0,08	52,8	4,224
644	3,968	0,06	53,6	3,216
645	3,972	-2,54	52,0	-132,080
646	3,976	-0,06	52,0	-3,120
647	3,980	-0,04	52,0	-2,080
648	3,984	-0,06	52,8	-3,168
649	3,988	0,00	53,6	0,000
650	3,992	-0,02	52,8	-1,056
651	3,996	-0,02	52,8	-1,056
652	4,000	0,02	52,8	1,056
653	4,004	-0,02	52,0	-1,040
654	4,008	-0,08	52,8	-4,224
655	4,012	0,00	52,8	0,000
656	4,016	0,00	53,6	0,000
657	4,020	0,00	8,8	0,000
658	4,024	-2,54	47,2	-119,888
659	4,028	-0,30	52,8	-15,840
660	4,032	-2,54	53,6	-136,144
661	4,036	0,00	52,8	0,000
662	4,040	-0,04	52,8	-2,112
663	4,044	-0,02	52,8	-1,056

664	4,048	-0,02	51,2	-1,024
665	4,052	-0,10	53,6	-5,360
666	4,056	0,02	52,8	1,056
667	4,060	-2,54	52,8	-134,112
668	4,064	-0,02	53,6	-1,072
669	4,068	0,00	52,8	0,000
670	4,072	-0,02	52,8	-1,056
671	4,076	0,00	52,8	0,000
672	4,080	-2,54	52,8	-134,112
673	4,084	-0,02	53,6	-1,072
674	4,088	0,00	52,8	0,000
675	4,092	0,06	52,8	3,168
676	4,096	0,00	52,8	0,000
677	4,100	0,02	53,6	1,072
678	4,104	0,04	48,0	1,920
679	4,108	0,06	52,8	3,168
680	4,112	0,04	53,6	2,144
681	4,116	-0,02	52,8	-1,056
682	4,120	0,04	52,8	2,112
683	4,124	0,06	52,8	3,168
684	4,128	0,02	53,6	1,072
685	4,132	-0,02	52,8	-1,056
686	4,136	0,00	52,8	0,000
687	4,140	0,06	52,8	3,168
688	4,144	-0,02	52,8	1,056
689	4,148	0,10	53,6	5,360
690	4,152	0,04	52,8	2,112
691	4,156	0,00	52,8	0,000
692	4,160	0,02	52,8	1,056
693	4,164	0,02	52,8	1,056
694	4,168	0,02	53,6	1,072
695	4,172	0,00	52,8	0,000
696	4,176	0,00	52,8	0,000
697	4,180	0,02	52,8	1,056
698	4,184	0,02	52,8	1,056
699	4,188	0,04	52,8	2,112
700	4,192	0,02	53,6	1,072
701	4,196	-0,02	52,8	-1,056
702	4,200	0,00	52,8	0,000
703	4,204	0,02	52,0	1,040
704	4,208	-0,28	53,6	-15,008
705	4,212	0,00	52,8	0,000
706	4,216	0,00	53,6	0,000
707	4,220	0,00	53,6	0,000
708	4,224	0,00	52,8	0,000

709	4,228	-2,00	52,8	-105,600
710	4,232	-0,02	52,8	-1,056
711	4,236	0,00	52,8	0,000
712	4,240	-2,24	52,8	-118,272
713	4,244	0,00	53,6	0,000
714	4,248	0,00	52,8	0,000
715	4,252	0,00	52,8	0,000
716	4,256	0,00	52,8	0,000
717	4,260	0,00	52,8	0,000
718	4,264	0,00	52,8	0,000
719	4,268	-2,54	52,8	-134,112
720	4,272	-0,02	52,8	-1,056
721	4,276	0,04	52,8	2,112
722	4,280	-0,08	52,8	-4,224
723	4,284	-0,40	52,8	-21,120
724	4,288	-0,02	52,8	-1,056
725	4,292	0,00	53,6	0,000
726	4,296	-0,02	52,8	-1,056
727	4,300	0,00	52,8	0,000
728	4,304	-0,02	52,8	-1,056
729	4,308	0,00	52,8	0,000
730	4,312	0,00	52,8	0,000
731	4,316	0,02	52,8	1,056
732	4,320	-0,44	52,8	-23,232
733	4,324	0,00	52,8	0,000
734	4,328	0,00	53,6	0,000
735	4,332	0,00	52,8	0,000
736	4,336	-0,02	52,8	-1,056
737	4,340	0,02	52,8	1,056
738	4,344	0,00	52,8	0,000
739	4,348	0,02	52,8	1,056
740	4,352	0,02	52,8	1,056
741	4,356	-0,02	52,8	-1,056
742	4,360	1,06	53,6	56,816
743	4,364	0,02	52,8	1,056
744	4,368	0,04	52,8	2,112
745	4,372	0,64	52,8	33,792
746	4,376	0,00	52,8	0,000
747	4,380	-0,02	52,8	-1,056
748	4,384	0,00	52,8	0,000
749	4,388	0,02	52,8	1,056
750	4,392	0,00	52,8	0,000

751	4,396	0,00	52,8	0,000
752	4,400	0,02	52,8	1,056
753	4,404	0,00	52,8	0,000
754	4,408	0,00	52,8	0,000
755	4,412	0,00	53,6	0,000
756	4,416	0,00	52,8	0,000
757	4,420	0,02	53,6	1,072
758	4,424	0,02	52,8	1,056
759	4,428	0,00	52,8	0,000
760	4,432	-0,02	52,8	-1,056
761	4,436	0,00	52,8	0,000
762	4,440	0,00	52,8	0,000
763	4,444	0,00	52,8	0,000
764	4,448	-0,02	52,8	-1,056
765	4,452	0,00	52,8	0,000
766	4,456	-0,02	52,8	-1,056
767	4,460	0,00	52,8	0,000
768	4,464	0,00	52,8	0,000
769	4,468	0,02	52,8	1,056
770	4,472	0,00	52,8	0,000
771	4,476	0,00	53,6	0,000
772	4,480	-0,98	52,8	-51,744
773	4,484	-0,02	52,8	-1,056
774	4,488	-0,02	52,8	-1,056
775	4,492	-0,02	52,8	1,056
776	4,496	0,00	52,8	0,000
777	4,500	-0,12	52,8	-6,336
778	4,504	0,00	52,8	0,000
779	4,508	0,02	52,8	1,056
780	4,512	0,00	52,8	0,000
781	4,516	0,00	52,8	0,000
782	4,520	-0,02	52,8	-1,056
783	4,524	-2,54	49,6	-125,984
784	4,528	-0,16	52,8	-8,448
785	4,532	-0,02	52,8	-1,056
786	4,536	-0,02	52,8	-1,056
787	4,540	-2,54	53,6	-136,144
788	4,544	0,00	52,8	0,000
789	4,548	0,00	53,6	0,000
790	4,552	-2,54	52,8	-134,112
791	4,556	-0,02	52,8	-1,056
792	4,560	-0,28	52,8	-14,784

Arsiran “Kuning” menunjukkan batas pengereman lengkap, arsiran “Hijau” menunjukkan batas pengereman Regeneratif saja.

- Waktu pengereman lengkap = $4,56 - 1,396 = 3,164$ detik
- Waktu pengereman Regeneratif saja = $3,968 - 1,396 = 2,572$ detik

Daya rata-rata = Total daya sesaat/total data

- Pengereman lengkap
Daya rata-rata = $9326,752 / 792 = 11,7762$ watt
- Pengereman Regeneratif saja
Daya rata-rata = $10798,99 / 644 = 16,76862$ watt

Energi = Daya rata-rata x waktu pengereman

- Pengereman lengkap
Energi = $11,7762 \times 3,164 = 0,01035$ Wh
- Pengereman Regeneratif saja
Energi = $16,76862 \times 2,572 = 0,01198$ Wh



Lampiran 7: Datasheet komponen penyusun VSI

1. Mikrokontroler Arduino Mega (ATMega2660).
2. IR2110.
3. IR3710.
4. Dioda *Ultrafast High Voltage Rectifier* STTH60L06CW.
5. Sensor arus ACS712-20A.



