

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN PUTARAN
DUA KUADRAN MOTOR ARUS SEARAH MAGNET PERMANEN
MENGUNAKAN *DC CHOPPER***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

HARFIN PRATAMA

NIM. 115060301111006 - 63

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN PUTARAN DUA KUADRAN
MOTOR ARUS SEARAH MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN DC**

CHOPPER

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

HARFIN PRATAMA

NIM. 115060301111006 – 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing 1

Pembimbing 2

DR. Rini Nur Hasanah, ST., M. Sc.

Eka Maulana, ST., MT., M. Eng.

NIP. 19680122 199512 2 001

NIK. 841130 06 1 1 0280

LEMBAR PENGESAHAN

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN PUTARAN DUA KUADRAN
MOTOR ARUS SEARAH MAGNET PERMANEN MENGGUNAKAN DC**

CHOPPER

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
Memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

HARFIN PRATAMA
NIM. 115060301111006 – 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 04 Juni 2015

DOSEN PENGUJI

Ir. Wijono, MT., Ph.D
NIP. 19621111 198903 1 003

Ir. Soeprapto, MT.
NIP. 19561020 198903 1 001

Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.
NIP. 19600701 1999002 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

PENGANTAR

Assalamualaikum wr. wb.

Puji syukur kita persembahkan kepada Allah SWT karena dengan rahmad-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian skripsi yang berjudul “**Rancang Bangun Sistem Pengendalian Putaran Dua Kuadran Motor Arus Searah Magnet Permanen Menggunakan DC Chopper**” ini dengan baik. Shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad Rasulullah SAW sebagai teladan dalam menghadapi berbagai masalah dalam penulisan penelitian skripsi ini. Penelitian skripsi ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Dalam kesempatan ini terima kasih ingin diucapkan kepada pihak-pihak tersebut diantaranya:

1. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ali Mustofa, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Sarjana Jurusan Teknik Elektro.
4. Ibu DR. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc. dan Bapak Eka Maulana, ST., MT., M.Eng. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dalam penelitian ini.
5. Ayahanda Ir. Iwan Rizali, MM., Ibunda Ririt Rusdiana, SE., dan Adik Yualief Riswanda yang selalu memberikan doa dan semangat.
6. Bapak Ir. Soeprpto, MT., selaku Kepala Laboratorium Elektronika Daya Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang memperbolehkan melakukan penelitian di laboratorium tersebut.
7. Indra Setyawan S.ST., Arizky Erwinsyah Hariyanto, Irham Tantowi Hamdi, Rafdi Dzulfikar Ramdhani, dan Fadianto Mirza yang telah banyak membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Dulurku Inverter 2011 yang memberikan pengalaman dan kenangan yang tak terlupakan.
9. Saudara-saudara Laboratorium Mesin Elektrik dan ‘kita hARUS KUAT’ yang telah menemani.

10. Andita Intan Larasati yang selalu memberikan motivasi serta doa dengan sabar dalam penyusunan penelitian skripsi ini.

11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penelitian ini dirasa masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu diharapkan saran dan kritik mengenai penelitian ini. Saran dan kritik ditujukan agar penelitian ini dapat menjadi tulisan ilmiah yang lebih baik dan bermanfaat. Akhir kata, semoga penelitian ini dapat memberikan kemajuan teknologi di Indonesia.

Malang, 3 Juni 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan	3
1.5. Manfaat	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Mesin Arus Searah (Mesin DC).....	5
2.2. <i>Buck Converter</i>	8
2.3. <i>Boost Converter</i>	11
2.4. MOSFET Daya	13
2.4.1. Karakteristik Keadaan Tunak	14
2.4.2. Karakteristik Pensaklaran	15
2.5. Mikrokontroler AVR ATmega16	15
2.6. Kaidah Putaran Torsi dan Operasi Multi Kuadran	16
2.7. Pengereman Elektrik.....	17



2.8.	Baterai <i>Lead-Acid</i>	18
------	--------------------------------	----

BAB III METODE PENELITIAN 21

3.1.	Studi Literatur	21
------	-----------------------	----

3.2.	Perancangan Alat	22
------	------------------------	----

3.2.1.	Penentuan Motor Arus Searah Magnet Permanen dan Baterai	24
--------	---	----

3.2.2.	Rangkaian Picu	24
--------	----------------------	----

3.2.3.	<i>Buck Converter</i>	24
--------	-----------------------------	----

3.2.4.	<i>Boost Converter</i>	24
--------	------------------------------	----

3.2.5.	Sensor Tegangan.....	25
--------	----------------------	----

3.3.	Simulasi Perancangan Alat	25
------	---------------------------------	----

3.3.1.	Simulasi <i>Buck Converter</i>	25
--------	--------------------------------------	----

3.3.2.	Simulasi <i>Boost Converter</i>	26
--------	---------------------------------------	----

3.4.	Pengujian dan Analisis.....	27
------	-----------------------------	----

3.4.1.	Pengujian Rangkaian Picu	27
--------	--------------------------------	----

3.4.2.	Pengujian <i>Buck Converter</i>	27
--------	---------------------------------------	----

3.4.3.	Pengujian <i>Boost Converter</i> Tanpa Umpan Balik.....	27
--------	---	----

3.4.4.	Pengujian <i>Boost Converter</i> Dengan Umpan Balik	27
--------	---	----

3.4.5.	Pengujian Sistem <i>Motoring</i>	27
--------	--	----

3.4.6.	Pengujian Sistem <i>Braking</i>	28
--------	---------------------------------------	----

3.5.	Pembuatan Alat.....	28
------	---------------------	----

3.6.	Kesimpulan dan Saran	28
------	----------------------------	----

BAB IV PERANCANGAN ALAT..... 29

4.1.	Penentuan Motor Arus Searah Magnet Permanen dan Baterai.....	29
------	--	----

4.1.1.	<i>Nameplate</i> Motor	29
--------	------------------------------	----

4.1.2.	Pengukuran Resistansi dan Induktansi Jangkar Motor	29
--------	--	----

4.1.3.	Baterai.....	29
--------	--------------	----

4.2.	Rangkaian Picu	29
4.2.1.	Sistem Minimum Mikrokontroler	30
4.2.2.	Perangkat Lunak Mikrokontroler	31
4.3.	Buck Converter	33
4.4.	Boost Converter	36
4.5.	Sensor Tegangan	39
BAB V SIMULASI PERANCANGAN ALAT		40
5.1.	Simulasi <i>Buck Converter</i>	40
5.1.1.	Penentuan Komponen Simulasi	40
5.1.2.	Prosedur Simulasi	40
5.1.3.	Hasil Simulasi <i>Buck Converter</i>	41
5.1.4.	Analisis Hasil Simulasi <i>Buck Converter</i>	42
5.2.	Simulasi <i>Boost Converter</i>	43
5.2.1.	Penentuan Komponen Simulasi	43
5.2.2.	Prosedur Simulasi	43
5.2.3.	Hasil Simulasi <i>Boost Converter</i>	43
5.2.4.	Analisis Hasil Simulasi <i>Boost Converter</i>	45
BAB VI PENGUJIAN DAN ANALISIS		47
6.1.	Pengujian Rangkaian Picu	47
6.1.1.	Alat Pengujian	47
6.1.2.	Prosedur Pengujian	47
6.1.3.	Hasil Pengujian Rangkaian Picu	47
6.1.4.	Analisis Hasil Pengujian Rangkaian Picu	48
6.2.	Pengujian <i>Buck Converter</i>	50
6.2.1.	Alat Pengujian	50
6.2.2.	Prosedur Pengujian	50

6.2.3.	Hasil Pengujian	50
6.2.4.	Analisis Hasil Pengujian <i>Buck Converter</i>	51
6.3.	Pengujian <i>Boost Converter</i> Tanpa Umpan Balik.....	53
6.3.1.	Alat Pengujian	53
6.3.2.	Prosedur Pengujian	54
6.3.3.	Hasil Pengujian <i>Boost Converter</i> Tanpa Umpan Balik	54
6.3.4.	Analisis Pengujian <i>Boost Converter</i> Tanpa Umpan Balik	55
6.4.	Pengujian <i>Boost Converter</i> Dengan Umpan Balik	57
6.4.1.	Alat Pengujian	57
6.4.2.	Prosedur Pengujian	58
6.4.3.	Hasil Pengujian <i>Boost Converter</i> Dengan Umpan Balik.....	58
6.4.4.	Analisis Hasil Pengujian <i>Boost Converter</i> Dengan Umpan Balik 59	
6.5.	Pengujian Sistem <i>Motoring</i>	59
6.5.1.	Alat Pengujian	59
6.5.2.	Prosedur Pengujian	59
6.5.3.	Hasil Pengujian	60
6.5.4.	Analisis Hasil Pengujian Sistem <i>Motoring</i>	60
6.6.	Pengujian Sistem <i>Braking</i>	61
6.6.1.	Alat Pengujian	61
6.6.2.	Prosedur Pengujian	61
6.6.3.	Hasil Pengujian	62
6.6.4.	Analisis Hasil Pengujian.....	62
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN		64
7.1.	Kesimpulan	64
7.2.	Saran	65

DAFTAR PUSTAKA..... 66
LAMPIRAN..... 67



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Penentuan parameter perancangan <i>buck converter</i>	33
Tabel 4.2	Komponen <i>buck converter</i>	36
Tabel 4.3	Penentuan parameter perancangan <i>boost converter</i>	36
Tabel 4.4	Komponen <i>boost converter</i>	39
Tabel 5.1	Penentuan komponen simulasi <i>buck converter</i>	40
Tabel 5.2	Hasil simulasi <i>buck converter</i>	41
Tabel 5.3	Penentuan komponen simulasi <i>boost converter</i>	43
Tabel 5.4	Hasil simulasi <i>boost converter</i>	44
Tabel 6.1	Hasil pengujian rangkaian picu	47
Tabel 6.2	Analisis hasil pengujian rangkaian picu	49
Tabel 6.3	Hasil pengujian <i>buck converter</i>	50
Tabel 6.4	Perbandingan antaran simulasi dan pengujian <i>buck converter</i>	53
Tabel 6.5	Hasil pengujian <i>boost converter</i> tanpa umpan balik	54
Tabel 6.6	Perbandingan simulasi dan pengujian <i>boost converter</i> tanpa umpan balik	57
Tabel 6.7	Hasil pengujian <i>boost converter</i> dengan umpan balik	58
Tabel 6.8	Hasil pengujian sistem <i>motoring</i>	60
Tabel 6.9	Hasil pengujian sistem <i>braking</i>	62
Tabel 6.10	Daya regeneratif terhadap putaran motor	62



DAFTAR GAMBAR

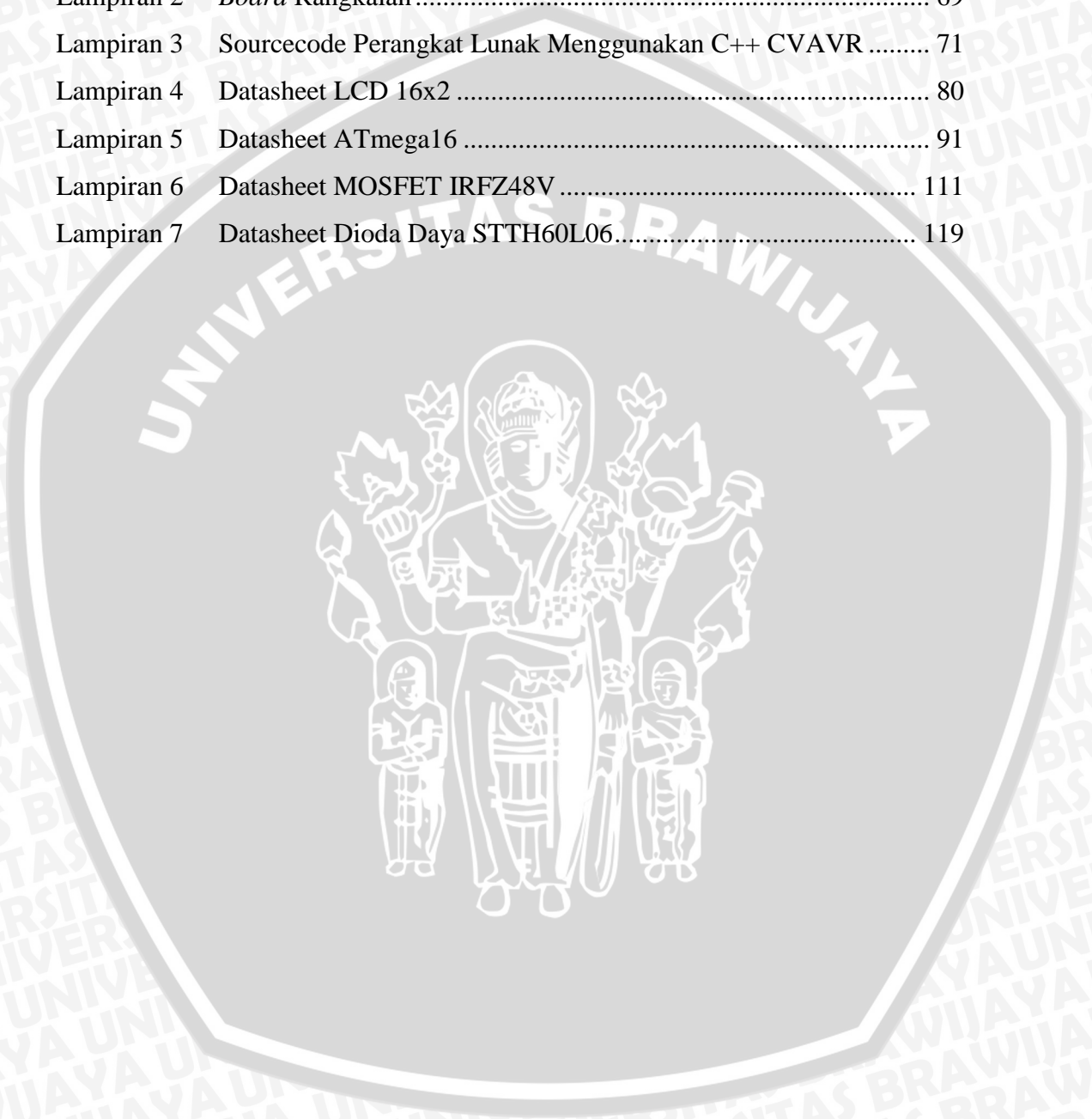
No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Representasi skematik mesin dc sumber: Arthur E. Fitzgerald (2003: 358)	5
Gambar 2.2	Koneksi rangkaian medan mesin dc. (a) penguat (eksitasi) terpisah, (b) seri, (c) <i>shunt</i> , dan (d) kompon.	6
Gambar 2.3	Karakteristik volt-ampere generator dc	7
Gambar 2.4	Karakteristik putaran-torsi motor dc	7
Gambar 2.5	<i>Dc-dc converter</i> . (a) <i>basic dc-dc switching converter</i> ; (b) rangkaian ekuivalen pensaklaran; (c) tegangan keluaran	8
Gambar 2.6	<i>Buck converter</i>	9
Gambar 2.7	Bentuk gelombang buck converter. (a) Tegangan induktor; (b) Arus induktor; (c) Arus kapasitor.	10
Gambar 2.8	Diagram skematik <i>boost converter</i>	12
Gambar 2.9	Tegangan keluaran <i>nonideal boost converter</i>	13
Gambar 2.10.	Mosfet kanal N	14
Gambar 2.11	Operasi multi kuadran	17
Gambar 2.12	Arus fungsi waktu untuk <i>constant-voltage charger</i>	19
Gambar 2.13	SOC dari empat baterai HEV	20
Gambar 3.1	Diagram alur metode penelitian	21
Gambar 3.2	Rangkaian sistem secara keseluruhan	22
Gambar 3.3	Diagram blok sistem	23
Gambar 3.4	Skematik <i>buck converter</i>	24
Gambar 3.5	Skematik <i>boost converter</i>	25
Gambar 3.6	Skematik diagram simulasi <i>buck converter</i>	26
Gambar 3.7	Skematik diagram simulasi <i>boost converter</i>	26
Gambar 4.1	SFE ATMEGA16 <i>Minimum System Integrated with USBAsp</i>	31
Gambar 4.2	Diagram alir perangkat lunak rangkaian picu	32
Gambar 4.3	Diagram skematik perancangan <i>buck converter</i>	35
Gambar 4.4	Diagram skematik perancangan <i>boost converter</i>	38
Gambar 4.5	Diagram skematik perancangan sensor tegangan.....	39



Gambar 5.1 Bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran simulasi <i>buck converter</i> pada <i>duty cycle</i> 50%	42
Gambar 5.2 Grafik tegangan keluaran fungsi <i>duty cycle</i> pada simulasi <i>buck converter</i>	42
Gambar 5.3 Bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran simulasi <i>boost converter</i> pada <i>duty cycle</i> 50%	45
Gambar 5.4 Grafik tegangan keluaran rms dan avg pada simulasi <i>boost converter</i>	46
Gambar 6.1 Keluaran tegangan pulsa rangkaian picu pada <i>duty cycle</i> 50%	48
Gambar 6.2 Keluaran tegangan dan arus <i>buck converter</i> pada <i>duty cycle</i>	51
Gambar 6.3 Grafik tegangan keluaran avg dan rms pada pengujian <i>buck converter</i>	52
Gambar 6.4 Grafik perubahan efisiensi terhadap perubahan <i>duty cycle</i> pada <i>buck converter</i>	52
Gambar 6.5 Keluaran tegangan dan arus <i>boost converter</i> pada saat <i>duty cycle</i> 50%	55
Gambar 6.6 Grafik tegangan keluaran rms dan avg pada pengujian <i>boost converter</i> tanpa umpan balik	56
Gambar 6.7 Grafik perubahan efisiensi terhadap perubahan <i>duty cycle</i> pada <i>boost converter</i>	56
Gambar 6.8 Grafik tegangan keluaran pada pengujian <i>boost converter</i> menggunakan umpan balik	59
Gambar 6.9 Grafik putaran fungsi <i>duty cycle</i> pada pengujian sistem <i>motoring</i> ...	61
Gambar 6.10 Grafik waktu pengereman regeneratif	63
Gambar 6.11 Grafik daya pengereman regeneratif	63

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Dokumentasi.....	67
Lampiran 2	<i>Board</i> Rangkaian.....	69
Lampiran 3	Sourcecode Perangkat Lunak Menggunakan C++ CVAVR.....	71
Lampiran 4	Datasheet LCD 16x2.....	80
Lampiran 5	Datasheet ATmega16.....	91
Lampiran 6	Datasheet MOSFET IRFZ48V.....	111
Lampiran 7	Datasheet Dioda Daya STTH60L06.....	119



RINGKASAN

Harfin Pratama, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Universitas Brawijaya, Juni 2015, ***Rancang Bangun Sistem Pengendalian Putaran Dua Kuadran Motor Arus Searah Magnet Permanen Menggunakan DC Chopper***, Dosen Pembimbing: Rini Nur Hasanah dan Eka Maulana.

Kemajuan teknologi yang sangat cepat membuat teknologi elektronika daya semakin berkembang, seperti munculnya *dc chopper* dan inverter. Dengan berkembangnya elektronika daya, muncullah teknologi-teknologi pengendalian yang murni menggunakan elektronika daya. Pengendalian motor listrik secara mekanik mulai ditinggalkan sejalan dengan kemajuan elektronika daya ini. Hal ini ditandai dengan meningkatnya penggunaan pengereman elektrik dibandingkan pengereman mekanik untuk pengereman motor listrik. Salah satu jenis pengereman elektrik tersebut adalah pengereman regeneratif. Pengereman regeneratif dapat menghemat 8%-25% daya yang digunakan untuk pengereman.

Tujuan dari operasi multi kuadran pada pengendalian motor listrik adalah untuk meningkatkan efisiensi energi listrik. Salah satu operasi multi kuadran tersebut adalah operasi dua kuadran. Operasi dua kuadran adalah mode operasi motor listrik pada saat *motoring* dan *braking* yang diaplikasikan menggunakan komponen listrik. Hasil yang diinginkan dari penelitian ini adalah terciptanya suatu alat dalam pengendalian dua kuadran untuk motor dc magnet permanen dengan menggunakan *dc chopper*. *DC chopper* yang digunakan pada penelitian ini adalah *buck converter* dan *boost converter*. Pada saat motor mode *motoring*, *dc chopper* yang digunakan adalah *buck converter*. Pada saat motor mode *braking*, *dc chopper* yang digunakan adalah *boost converter*. Dengan meningkatnya *duty cycle* pada saat mode *motoring*, maka putaran pun akan meningkat. Pada mode *braking*, digunakan pengereman regeneratif dengan prinsip pengecasan baterai yang digunakan adalah *constant voltage* dan sensor yang digunakan adalah sensor tegangan berupa pembagi tegangan. Pada penelitian ini akan dicari karakteristik pengaruh perubahan *duty cycle* pada putaran motor ketika mode *motoring* dan juga daya yang dihasilkan pada pengereman regeneratif. Daya regeneratif tidak dapat konstan dengan menggunakan skema ini, sebaliknya daya regeratif meningkat dengan meningkatnya putaran sebelum pengereman.

Kata kunci— motor arus searah magnet permanen, dua kuadran, *buck converter*, *boost converter*, pengereman regeneratif.

SUMMARY

Harfin Pratama, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, June 2015, *Design of Two Quadrant Speed Control For Permanent Magnet DC Motor Using DC Choppers*, Academic Supervisor: Rini Nur Hasanah and Eka Maulana.

Power electronics technology is advancing through the rapid advance of technology. Some evidences of this advancing technology are dc chopper and inverter. Nowadays, controlling of electrical motor by using power electronics is selected by many electrical drives designer. As the outcome of it, electrical braking is applied in many electrical motor drives. One kind of electrical braking is regenerative braking. Regenerative braking could save about 8%-25% of power used on braking.

The purpose of multi-quadrant operations on controlling an electric motor is to improve the efficiency of electrical energy. One of multi-quadrant operations is two-quadrant operation. Two-quadrant operation is the operating mode of the electric motor when motoring and braking is applied by using electrical components. The desired outcome of this research is the creation of a device for two-quadrant speed controller for a permanent magnet brushed dc motor by using dc choppers. DC choppers used in this research are buck converter and boost converter. Buck converter is used on motoring mode. Meanwhile, boost converter is used on braking mode. With the increased duty cycle when the motoring mode, the speed will increase. In the braking mode, this device uses regenerative braking. Principle of charging a battery used is constant voltage. Voltage divider is used as the voltage sensor. This research will seek characteristics of the effects of changes in the duty cycle to motor speed due to motoring mode and also the power generated in regenerative braking. Regenerative power could not be constant by using this outline, on the contrary regenerative power will increase with the increased speed of motor right before braking.

Keywords— permanent magnet brushed dc motor, two quadrant operation, buck converter, boost converter, regenerative braking.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan teknologi yang sangat cepat membuat teknologi elektronika daya semakin berkembang, seperti munculnya *dc chopper* dan inverter. Dengan berkembangnya elektronika daya, muncullah teknologi-teknologi pengendalian yang murni menggunakan elektronika daya. Pengendalian motor listrik secara mekanik mulai ditinggalkan sejalan dengan kemajuan elektronika daya ini. Hal ini ditandai dengan meningkatnya penggunaan pengereman elektrik dibandingkan pengereman mekanik untuk pengereman motor listrik.

Untuk meningkatkan efisiensi energi listrik yang tinggi, digunakan operasi multi kuadran pada pengendalian motor listrik. Salah satu operasi multi kuadran tersebut adalah operasi dua kuadran. Operasi dua kuadran adalah mode operasi motor listrik pada saat *motoring* dan *braking* yang diaplikasikan menggunakan komponen listrik. Pengereman (*braking*) listrik terdapat dua jenis, yaitu pengereman rheostat dan pengereman regeneratif. Pengereman regeneratif adalah pengereman listrik yang paling efisien, karena dapat menghemat 8%-25% daya yang digunakan untuk pengereman (Yoong, et al., 2010). Sehingga, pada penelitian akan digunakan pengereman regeneratif pada kuadran II.

Motor dc (motor arus searah) terdiri dari dua jenis, yaitu motor dc penguat terpisah dan motor dc penguat sendiri. Motor dc penguat terpisah membutuhkan dua suplai daya, sedangkan motor dc penguat sendiri hanya membutuhkan satu suplai daya. Motor dc penguat sendiri juga dibagi menjadi tiga jenis, yaitu: motor dc seri, motor dc *shunt*, dan motor dc kompon. Pada motor dc penguat terpisah medan bisa dibuat konstan dengan mengganti belitan medan dengan magnet permanen, motor dc ini disebut motor dc magnet permanen. Karena kemudahan dalam pengontrolannya, mesin dc sering digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan pengontrolan kecepatan motor dengan jangkauan yang lebar dan pengontrolan presisi keluaran motor (Fitzgerald, Kingsley, Jr., & Umans, 2003). Pada penelitian ini digunakan motor dc magnet permanen, dengan pertimbangan

pengoperasiannya sebagai generator relatif lebih optimal dari pada motor dc penguat sendiri.

DC Chopper terdiri dari banyak jenis, beberapa jenisnya adalah *buck converter* dan *boost converter*. *Buck converter* berfungsi sebagai penurun level tegangan dc, sedangkan *boost converter* berfungsi sebagai penaik level tegangan dc. Pada penelitian ini menggunakan *buck converter* dan *boost converter*, dengan pertimbangan tegangan keluarannya yang mendekati dc murni agar tidak terlalu berdampak terhadap catu daya.

Sistem pengendalian putaran dua kuadran ini dapat di aplikasikan pada banyak hal. Salah satunya adalah elevator. Ketika elevator naik mode yang digunakan adalah motoring, sedangkan ketika elevator turun mode yang digunakan adalah mode *braking*. Kebanyakan sekarang mode *braking* sudah menggunakan pengereman regeneratif, karena pengereman regeneratif dapat menghemat energi yang digunakan. Sistem ini juga dapat digunakan pada mobil listrik, seperti pada mobil listrik produksi Tesla Motors.

Beberapa pernyataan di atas memberikan gambaran tentang pentingnya penelitian tentang sistem pengendalian multi kuadran (terutama dua kuadran). Oleh karena itu penulis mengangkat “**Rancang Bangun Pengendalian Putaran Dua Kuadran Motor Arus Searah Magnet Permanen Menggunakan *DC Chopper***” sebagai judul penelitian ini.

1.2. Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang diuraikan dalam latar belakang, maka rumusan masalah yang ada pada Rancang Bangun Pengendalian Putaran Dua Kuadran Motor Arus Searah Magnet Permanen Menggunakan *DC Chopper* adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengendalian pada kuadran I dan kuadran II.
2. Bagaimana rancangan sistem pengendalian dua kuadran ini.
3. Berapa *error* antara hasil pengujian dan simulasi.
4. Bagaimana kinerja serta berapa efisiensi dari sistem pengendalian dua kuadran ini.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diajukan dalam penelitian ini antara lain:

1. Efek harmonisa pensaklaran diabaikan.
2. Suplai daya yang digunakan adalah baterai *lead-acid* 12 V.
3. Daya motor yang digunakan di antara 50 W sampai dengan 100 W.

1.4. Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat sistem pengendalian dua kuadran yang terdiri dari mode *motoring* dan mode *braking* sebagai aplikasi dari *dc chopper*, serta untuk mengetahui kinerja dari rancang bangun sistem pengendalian dua kuadran motor *dc* magnet permanen ini.

1.5. Manfaat

Terdapat beberapa manfaat dari rancang bangun ini, yaitu bagi penulis dan bagi Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Manfaat bagi penulis adalah memberikan pengalaman merancang dan membangun sebuah sistem pengendalian multi kuadran mesin elektrik dan menyelesaikan syarat kelulusan berupa skripsi. Manfaat bagi Fakultas Teknik Universitas Brawijaya adalah terdapatnya peluang lebih lanjut untuk meneliti dan mengembangkan teknologi pengendalian multi kuadran.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini terdiri dari tujuh bab, yaitu:

- BAB I : PENDAHULUAN
Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika pembahasan.
- BAB II : TINJAUAN PUSTAKA
Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diungkap
- BAB III : METODE PENELITIAN
Berisi tahapan penyelesaian skripsi ini yang meliputi studi literatur, perancangan dan pengujian, pengambilan data, perhitungan dan analisis data.

BAB IV : PERANCANGAN ALAT

Berisi data-data perancangan termasuk model perancangan yang akan disimulasikan dan dibangun.

BAB V : SIMULASI PERANCANGAN ALAT

Berisi hasil simulasi dengan data-data masukan dari perancangan alat.

BAB VI : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Berisi pengujian dan analisis performansi dari hasil perancangan alat dan pengambilan data primer kemudian dianalisis sesuai dengan keadaan sebenarnya.

BAB VII : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari perancangan dan pembangunan alat dan saran untuk penelitian selanjutnya.



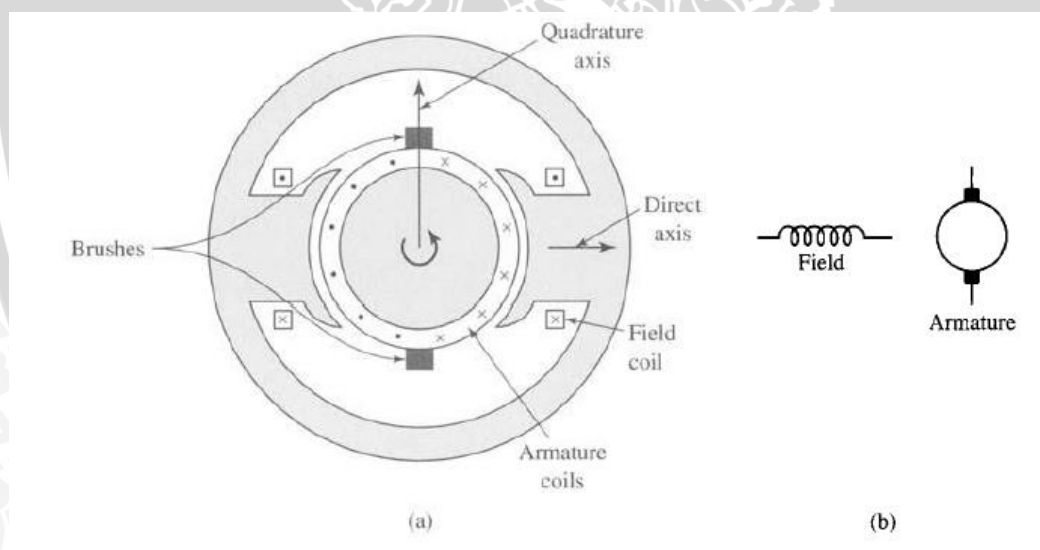
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin Arus Searah (Mesin DC)

Mesin-mesin dc dikarakteristikan oleh karakteristiknya yang beraneka ragam. Yang dimaksud oleh pernyataan tersebut adalah variasi kombinasi kumparan medan *shunt*, seri dan terpisah dapat menunjukkan variasi karakteristik volt-ampere atau putaran-torsi untuk operasi dinamis dan keadaan tunak (Fitzgerald, Kingsley, Jr., & Umans, 2003).

Keistimewaan dasar mesin dc ditunjukkan secara skematik pada Gambar 2.1. Stator mesin ini mempunyai kutub menonjol dan dieksitasi oleh satu atau lebih lilitan medan. Distribusi fluksi celah udara yang dihasilkan oleh kumparan medan merupakan distribusi yang simetris terhadap garis pusat kutub-kutub medan. Sumbu ini disebut sumbu medan atau *direct axis*.

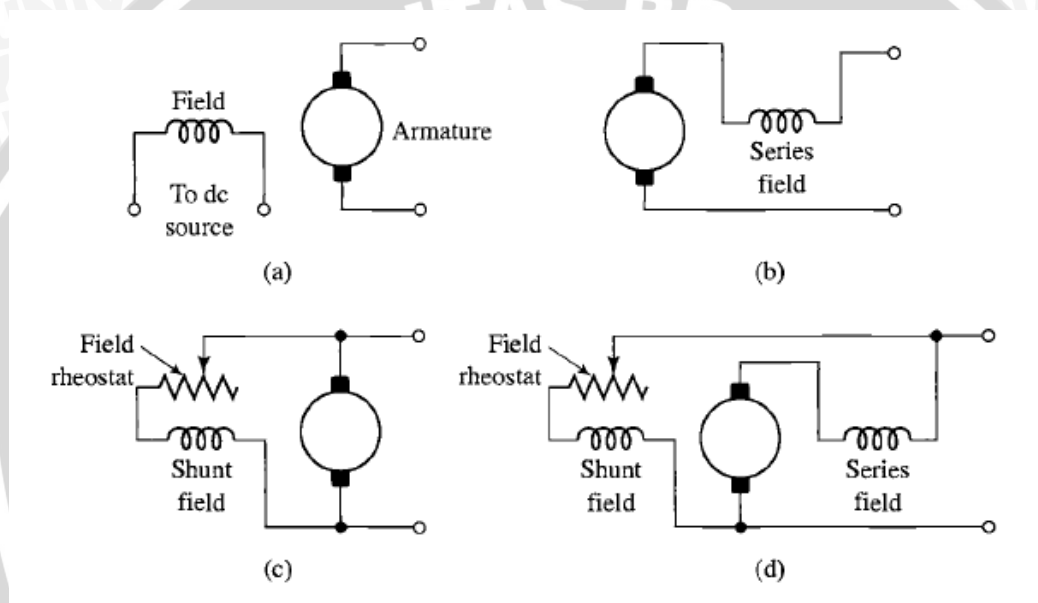


Gambar 2.1 Representasi skematik mesin dc
sumber: Arthur E. Fitzgerald (2003: 358)

Sikat diletakkan secara demikian agar komutasi terjadi ketika sisi-sisi lilitan terletak pada zona netral, tengah-tengah antara kutub-kutub medan. Sumbu gelombang ggm jangkar adalah 90 derajat listrik dari sumbu kutub medan, sumbu ini disebut *quadrature axis*. Dalam Gambar 7.1 a, sikat-sikat mesin tersebut diperlihatkan di *quadrature axis* karena posisi ini adalah posisi lilitan yang mana

lilitan tersebut dihubungkan. Gelombang ggm jangkar kemudian adalah sepanjang sumbu sikat, seperti yang diperlihatkan. Untuk lebih sederhananya, representasi rangkaiannya biasanya digambar seperti pada Gambar 7.1 b.

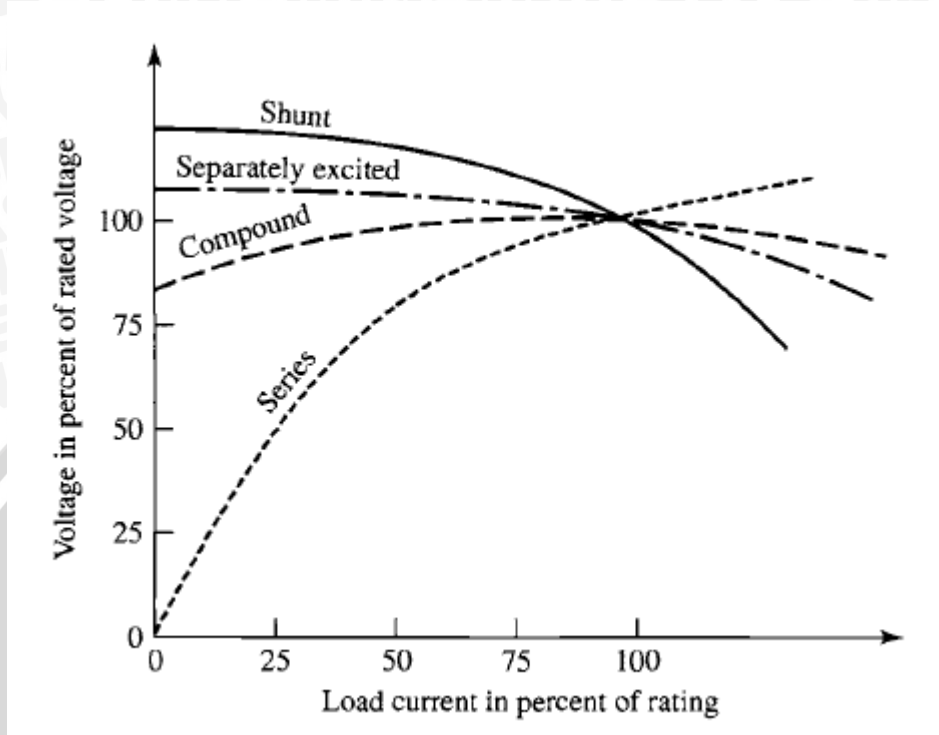
Keuntungan mesin dc adalah variasi karakteristik operasi yang didapatkan dari pemilihan metode eksitasi kumparan medan (Fitzgerald, Kingsley, Jr., & Umans, 2003). Berbagai macam koneksi medan mesin dc diperlihatkan pada Gambar 2.2. Metode eksitasi sangat besar mempengaruhi karakteristik keadaan tunak dan karakteristik dinamis sistem kontrol mesin ini.



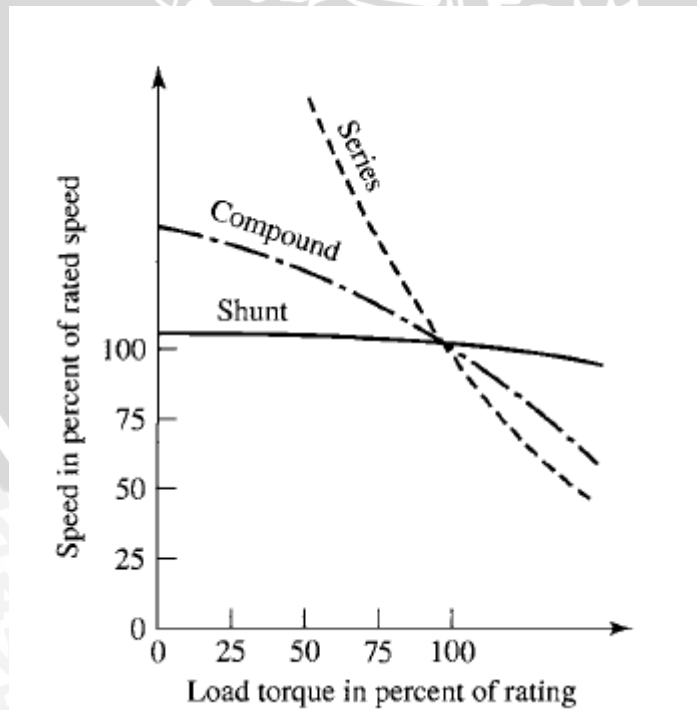
Gambar 2.2 Koneksi rangkaian medan mesin dc. (a) penguat (eksitasi) terpisah, (b) seri, (c) *shunt*, dan (d) kompon. sumber: Arthur E. Fitzgerald (2003: 361)

Setiap metode koneksi medan, menghasilkan karakteristik volt-ampere yang berbeda untuk setiap mesin dc yang dioperasikan sebagai generator, maupun karakteristik putaran torsi untuk setiap mesin dc yang dioperasikan sebagai motor. Bila kita melihat pada Gambar 2.3, terdapat perbedaan yang sangat besar untuk karakteristik generator penguat terpisah, dc *shunt*, dan seri. Tegangan generator dc seri sangat tergantung oleh arus beban, sehingga mesin dc seri tidak cocok digunakan sebagai pengereman regeneratif. Pada karakteristik putaran-torsi yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, putaran motor dc magnet permanen relatif lebih stabil dari pada motor dc jenis lainnya. Dari beberapa pernyataan sebelumnya, maka

pada penelitian ini menggunakan motor dc magnet permanen sebagai penggerak utama.



Gambar 2.3 Karakteristik volt-ampere generator dc
 Sumber: Arthur E. Fitzgerald (2003: 362)

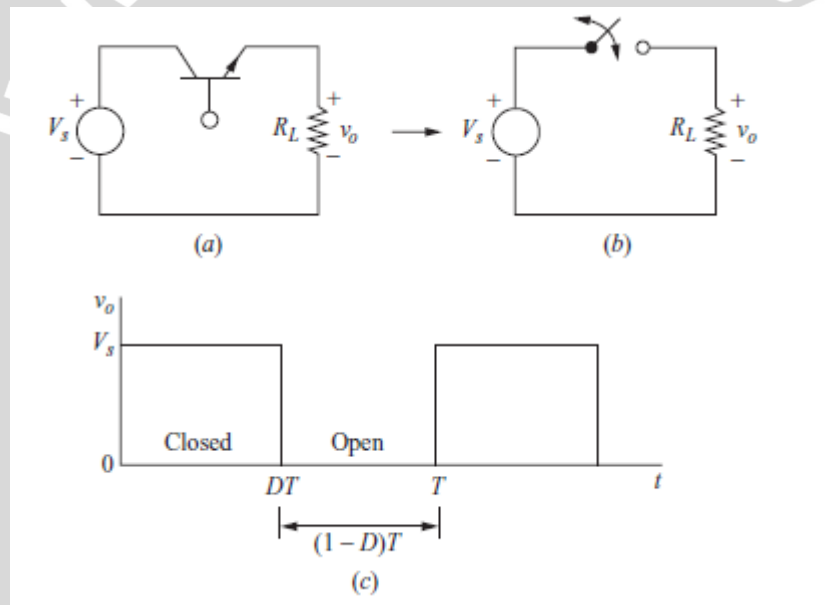


Gambar 2.4 Karakteristik putaran-torsi motor dc

Sumber: Arthur E. Fitzgerald (2003: 363)

2.2. Buck Converter

Buck converter termasuk salah satu perangkat *dc-dc converter* (*dc chopper*). *dc chopper* mempunyai masukan dan keluaran dc (Rashid & Rashid, 2006). Salah satu alternatif yang efisien untuk konfigurasi tersebut adalah dengan menggunakan *switching converter* (konverter pensaklaran). Diasumsikan bahwa *switch* (saklar) ideal pada Gambar 2.5 (a), keluaran sama dengan masukan ketika saklar tertutup, dan keluaran sama dengan nol ketika saklar terbuka. Pembukaan dan penutupan saklar secara periodik menghasilkan keluaran pulsa seperti pada Gambar 2.5 (b). Komponen dc tegangan keluaran dikontrol dengan mengatur *duty cycle* D .



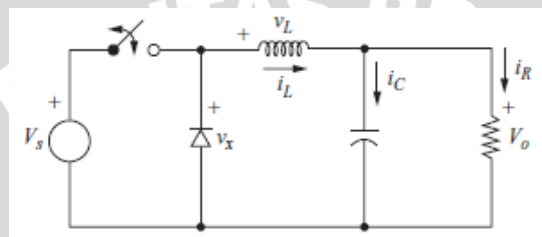
Gambar 2.5 Dc-dc converter. (a) basic dc-dc switching converter; (b) rangkaian ekuivalen pensaklaran; (c) tegangan keluaran

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 197)

$$D \equiv \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (2.1)$$

Dimana t_{on} adalah waktu ketika saklar tertutup pada satu periode, t_{off} adalah waktu ketika saklar terbuka pada satu periode, T adalah periode pensaklaran, dan f adalah frekuensi pensaklaran.

Pengontrolan komponen dc tegangan keluaran pulsa dengan tipe yang sama pada Gambar 2.5 mencakupi untuk beberapa aplikasi, seperti pengontrolan kecepatan motor dc, akan tetapi sering kali tujuannya adalah untuk menghasilkan keluaran yang murni dc. Salah satu cara untuk mendapatkan keluaran dc dari rangkaian pada Gambar 2.5 (a) adalah dengan menambahkan *low-pass filter* setelah saklar. Gambar 2.6 memperlihatkan penambahan *LC low-pass filter* ke *basic converter*. Dioda menyediakan lintasan untuk arus induktor ketika saklar terbuka dan dibias mundur ketika saklar tertutup.

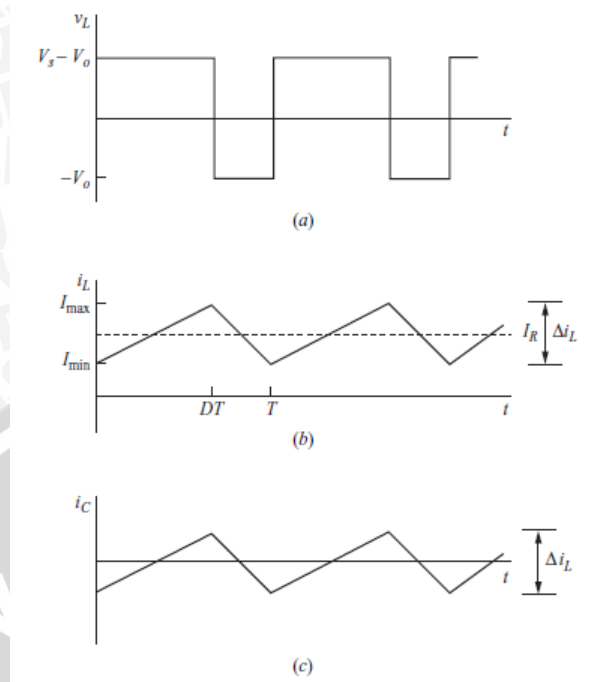


Gambar 2.6 *Buck converter*
Sumber: Daniel W. Hart (2011: 199)

Rangkaian pada Gambar 2.6 disebut *buck converter* atau *dc step down converter* karena memiliki tegangan keluaran yang lebih kecil atau sama dengan tegangan masukan. Bentuk gelombang keluaran *buck converter* dapat dilihat pada Gambar 2.7 (a). Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan tegangan keluaran dan masukan pada Persamaan 2.2.

$$V_o = V_s D \quad (2.2)$$

dimana V_o adalah tegangan keluaran dan V_s adalah tegangan masukan. Karena nilai *duty cycle* berada di antara nol sampai satu, maka nilai tegangan keluaran tidak akan pernah melebihi nilai tegangan masukan pada konverter ini.



Gambar 2.7 Bentuk gelombang buck converter. (a) Tegangan induktor; (b) Arus induktor; (c) Arus kapasitor.

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 201)

Dalam perancangan *buck converter*, selisih nilai arus induktor puncak ke puncak sering digunakan sebagai kriteria perancangan seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 (b). Nilai induktansi untuk selisih nilai arus puncak ke puncak tertentu dapat dicari menggunakan Persamaan 2.3 di bawah ini.

$$L = \frac{V_o(1-D)}{\Delta i_L f} \tag{2.3}$$

dimana Δi_L adalah selisih nilai arus induktor puncak ke puncak. Sedangkan, nilai induktansi minimum untuk mendapatkan arus yang kontinu dapat dicari dengan:

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{2.4}$$

dimana R adalah besar resistansi beban. Untuk mendapatkan arus yang kontinu nilai induktansi L harus lebih besar dari Lmin. Beberapa perancang memilih nilai induktansi sebesar 25% lebih besar dari Lmin. Perancang lainnya menggunakan kriteria lain seperti 40% dari nilai rata-rata arus induktor. Nilai Δi_L yang lebih kecil menghasilkan nilai arus puncak dan rms induktor yang lebih kecil dan semakin

kecil arus rms kapasitor, akan tetapi hal tersebut membutuhkan induktor yang lebih besar.

Kapasitor digunakan untuk menjaga tegangan keluaran agar tetap konstan. Namun dalam praktiknya, tegangan keluaran tidak dapat dijaga benar-benar konstan dengan kapasitansi yang terbatas. Nilai kapasitansi dapat dicari dengan Persamaan 2.5 dengan $\Delta V_o/V_o$ merupakan besar *ripple*¹ yang terjadi per tegangan keluaran.

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} \quad (2.5)$$

Kapasitor sesungguhnya dapat dimodelkan sebagai kapasitansi dengan sebuah *equivalent series resistance* (ESR) dan sebuah *equivalent series inductance* (ESL). ESR memiliki efek yang lebih signifikan pada *ripple* tegangan keluaran dibandingkan ESL (Daniel W. Hart, 2011: 206). ESR sering menghasilkan *ripple* yang sangat lebih besar dari pada kapasitor ideal. Terdapat berbagai cara untuk mengurangi ESR, dengan memparalelkan beberapa kapasitor atau dengan menggunakan *low-ESR capacitor*.

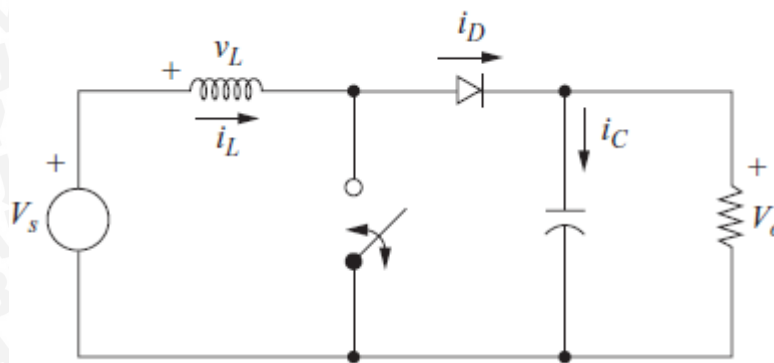
2.3. Boost Converter

Diagram skematik *boost converter* diperlihatkan pada Gambar 2.8. Rangkaian daya ini adalah salah satu konverter pensaklaran yang dioperasikan dengan membuka dan menutup saklar elektronik secara periodik (Hart, 2011). Rangkaian ini disebut *boost converter* karena tegangan keluarannya lebih besar dari pada masukan, sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (2.6)$$

dimana V_o adalah tegangan keluaran, V_s adalah tegangan masukan, dan D adalah *duty cycle*.

¹ *ripple* adalah variasi tegangan keluaran



Gambar 2.8 Diagram skematik *boost converter*
 Sumber: Daniel W. Hart (2011: 212)

Fungsi dari induktor tersebut adalah untuk membuat arus yang kontinyu. Nilai induktansi minimum sebuah *boost converter* agar arus keluarannya kontinyu adalah sebagai berikut:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.7)$$

dimana R adalah resistansi beban dan f adalah frekuensi pensaklaran. *Boost converter* yang didisain untuk beroperasi dengan arus yang kontinyu adalah CCM (*Continuous Current Mode Boost Converter*). Agar nilai induktansi kecil, maka banyak disainer *boost converter* meninggikan frekuensi pensaklaran.

Untuk perspektif perancangan biasanya L diekspresikan untuk mendapatkan nilai Δi_L (selisih antara nilai maksimal dan minimal pada arus yang mengalir melewati induktor) yang telah ditentukan sebelum memulai perancangan. Formula yang menggambarannya adalah sebagai berikut:

$$L = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (2.8)$$

Kapasitor pada Gambar 2.8 berfungsi untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran. Nilai kapasitansi yang dibutuhkan untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} \quad (2.9)$$

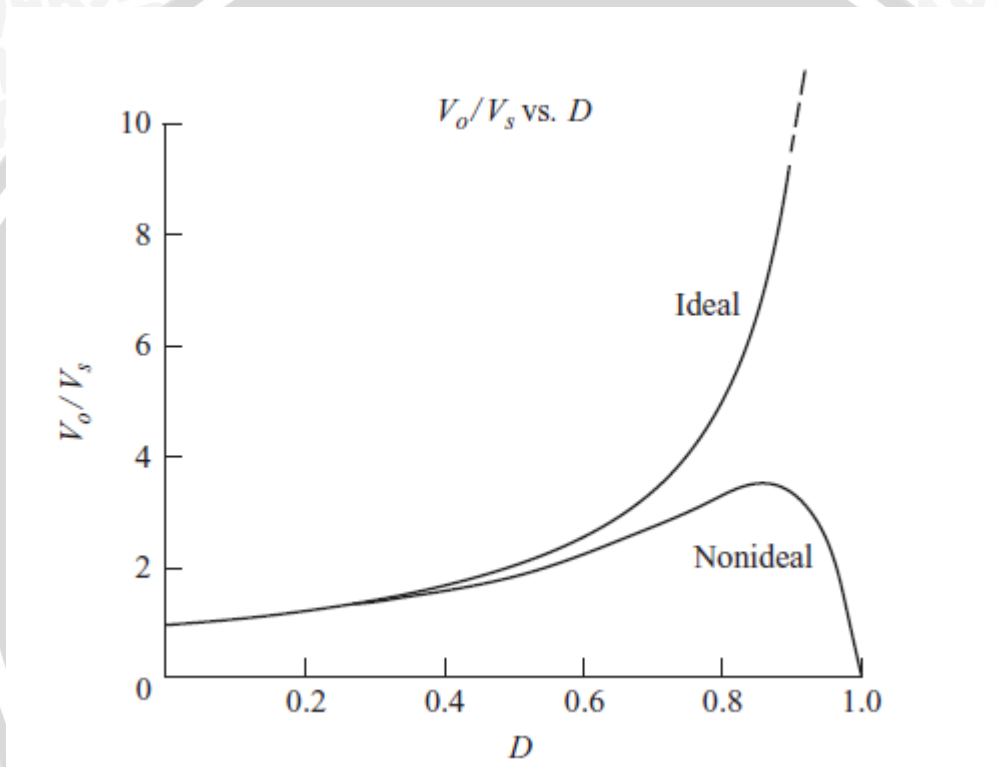
dimana $\Delta V_o / V_o$ adalah rasio *ripple* tegangan.

Induktor harus didisain untuk mempunyai resistansi yang kecil untuk meminimalisasi rugi daya dan memaksimalkan efisiensi. Resistansi induktor mempengaruhi kinerja *boost converter*, terutama pada *duty cycle* yang tinggi (Hart,

2011). Sehingga menyebabkan perubahan pada persamaan tegangan masukan dan keluaran menjadi:

$$V_o = \left(\frac{V_s}{1-D} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{r_L}{R(1-D)^2}} \right) \quad (2.10)$$

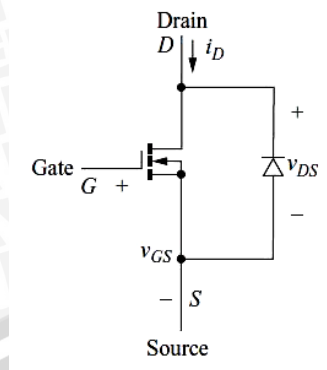
dimana r_L adalah resistansi induktor. Dari persamaan di atas menyebabkan tegangan keluaran *boost converter* menjadi tidak maksimal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Tegangan keluaran *nonideal boost converter*
Sumber: Daniel W. Hart (2011: 220)

2.4. MOSFET Daya

MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) adalah transistor *switching* yang sangat cepat dan sering digunakan untuk aplikasi yang melibatkan frekuensi tinggi sampai 1 MHz dan daya hingga beberapa kilowatt (Sen, 1997). Ada beberapa nama dagang mosfet lainnya seperti HEXFET (International Rectifier), SIMMOS (Siemens) dan TIMOS (Motorola). Lambang MOSFET ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Mosfet kanal N
Sumber: Hart (2011: 198)

Mosfet memiliki dua tipe, yakni tipe depleksi dan tipe *enhancement*. MOSFET tipe depleksi kanal-n dibentuk dari substrat silikon tipe-p dengan dua silikon yang didoping n^+ agar memiliki resistansi hubungan yang rendah. Gerbang diisolasi dengan lapisan oksida. Tiga terminal disebut *gate*, *drain*, dan *source*. Tegangan gerbang ke sumber dapat bernilai positif maupun negatif. Jika V_{GS} negatif, banyak dari elektron pada daerah kanal n akan tersingkir dan suatu daerah depleksi akan terbentuk di bawah lapisan oksida yang menghasilkan kanal efektif lebih lebar dan resistansi yang tinggi dari *drain* ke *source*, R_{DS} . Jika V_{GS} dibuat cukup negatif, kanal akan terdepleksi penuh yang menghasilkan R_{DS} tinggi dan tidak ada arus yang mengalir dari *drain* ke *source* atau $I_{DS} = 0$. Pada kondisi tersebut nilai V_{GS} disebut tegangan *pinch-off*. Ketika V_{GS} dibuat positif, kanal menjadi lebih lebar dan I_{DS} akan meningkat karena reduksi dari R_{DS} .

MOSFET tipe *enhancement* tidak memiliki kanal-n secara fisik. Jika V_{GS} positif, suatu tegangan induksi akan menarik elektron dari substrat p dan mengumpulkannya di permukaan bawah lapisan oksida. Jika V_{GS} lebih besar atau sama dengan nilai yang dikenal sebagai tegangan *threshold* maka jumlah elektron yang terakumulasi akan cukup untuk membentuk kanal-n virtual dan arus mengalir *drain* ke *source*.

2.4.1. Karakteristik Keadaan Tunak

Mosfet adalah komponen yang dikendalikan oleh tegangan dan memiliki impedansi masukan yang sangat tinggi. Gerbang akan menghasilkan arus bocor yang sangat kecil pada orde nanoampere. Transkonduktansi adalah perbandingan

antara arus *drain* terhadap tegangan *gate* dan merupakan parameter yang sangat penting.

Ada tiga daerah operasi, yaitu *cut-off* ($V_{GS} \leq V_T$), daerah saturasi ($V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$), dan daerah linier ($V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$). Pada daerah linier, arus *drain* akan bervariasi secara proporsional terhadap tegangan *drain* ke *source*. Karena arus *drain* yang tinggi dan tegangan *drain* yang rendah, pada aksi *switching* mosfet daya dioperasikan pada daerah linier. Pada daerah saturasi, arus *drain* akan konstan untuk sebarang peningkatan V_{DS} .

Pada mosfet tipe depleksi, tegangan gerbang dapat bernilai positif atau negatif, tetapi mosfet tipe *enhancement* hanya bereaksi pada tegangan gerbang positif. Secara umum mosfet yang banyak digunakan adalah tipe *enhancement*. Mosfet tipe depleksi memiliki keuntungan karena dapat menyederhanakan desain rangkaian logika yang cocok dengan bentuk logika saklar ac atau dc yang mana akan tetap tersambung ketika tegangan catu jatuh dan V_{GS} menjadi nol.

2.4.2. Karakteristik Pensaklaran

Turn on delay $T_{d(on)}$ adalah waktu yang dibutuhkan kapasitansi internal untuk *charging* ke tegangan *threshold*. *Risetime* T_r adalah waktu *charging* dari tegangan *threshold* ke tegangan *gate* penuh (V_{GSP}). *Turn off delay* $T_{d(off)}$ adalah waktu yang dibutuhkan dari kapasitansi internal MOSFET untuk *discharging* dari tegangan *gate*, V_1 ke daerah *pinch off*. *Fall time*, T_f adalah waktu yang dibutuhkan kapasitansi internal MOSFET untuk *discharging* pada daerah *pinch off* ke tegangan *threshold*. Jika $V_{GS} \leq V_{Th}$, MOSFET padam.

2.5. Mikrokontroler AVR ATmega16

Mikrokontroler adalah sebuah komputer kecil ("*special purpose computers*") di dalam satu IC yang berisi CPU, memori, *timer*, saluran komunikasi serial dan paralel, *port input/output*, dan ADC (*analog-to-digital converter*) (Adrianto, 2013). Mikrokontroler digunakan untuk suatu tugas dan menjalankan suatu program. Mikrokontroler AVR ATmega16 adalah mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini.

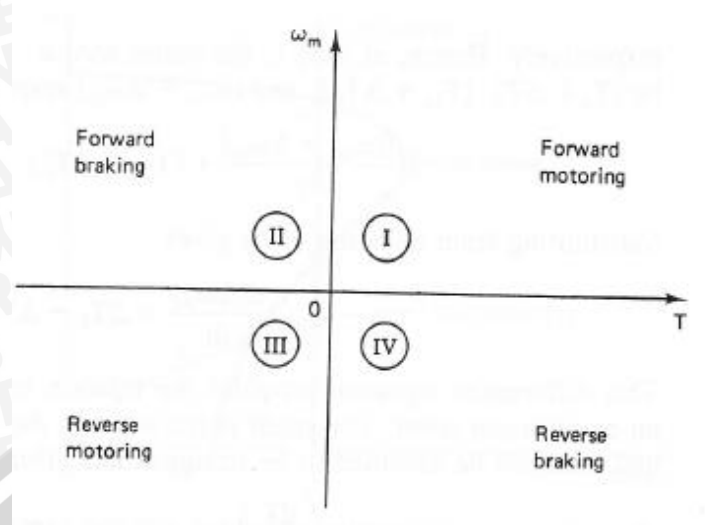
Di dalam mikrokontroler terdapat mikroprosesor, yang merupakan CPU dari mikrokontroler itu sendiri (Adrianto, 2013). Mikroprosesor terdiri dari dua tipe, yaitu CISC (*Complex Instruction Set Computer*) dan RISC (*Reduce Instruction Set Computer*). CISC merupakan jenis mikroprosesor yang memiliki jumlah instruksi yang kompleks dan lengkap. Mikrokontroler yang memakai mikroprosesor jenis ini adalah Intel 80C51 (MCS51) dan Motorola 68HC11. RISC merupakan jenis mikroprosesor yang memiliki jumlah instruksi yang terbatas dan sedikit. Pada arsitektur RISC jumlah instruksi lebih sedikit, tetapi memiliki banyak register dibandingkan dengan CISC. Selain itu pada arsitektur RISC kebanyakan instruksi dieksekusi hanya dalam satu *clock cycle* dan mode *addressing memory* yang sederhana. Mikrokontroler yang memakai mikroprosesor jenis ini adalah ATMEL AVR, Microchip PIC12/16CXX dan National Semiconductor COP8.

Pemrograman mikrokontroler AVR dapat menggunakan *low level language* (*assembly*) dan *high level language* (C, Basic, Pascal, Java, dan lain-lain) tergantung dari *compiler* yang digunakan (Adrianto, 2013). Bahasa memiliki keunggulan dibanding bahasa *assembler* yaitu tidak bergantung pada perangkat keras serta lebih mudah menangani proyek yang besar. Bahasa C sendiri sebenarnya terletak di antara bahasa pemrograman tingkat tinggi dan bahasa pemrograman tingkat rendah.

Terdapat enam blok arsitektur AVR, yaitu ALU (*Arithmetic Logic Unit*), program memori, *program counter* (PC), *General Purpose Working Register* (GPR), *Static Random Access Memory* (SRAM), dan *Internal Pheripheral* (Winoto, 2010).

2.6. Kaidah Putaran Torsi dan Operasi Multi Kuadran

Dalam mesin elektrik, torsi biasanya diekspresikan dalam sebuah persamaan fungsi putaran (atau slip), dan selanjutnya putaran diperlakukan sebagai sebuah variabel bebas dan torsi sebagai varibel terikat. Sehingga, putaran diplot di sumbu X dan torsi di sumbu Y. Dalam pengaturan putaran, torsi dianggap variabel bebas, sehingga torsi diletakkan di sumbu X. Kemudian kecepatan menjadi varibel terikat, sehingga kecepatan diletakkan di sumbu Y (Dubey, 2001).



Gambar 2.11 Operasi multi kuadran
Sumber: Gopal K. Dubey (2001: 11)

Alasan penggunaan kaidah ini adalah sebagai berikut: ketika memilih pengatur putaran, hal pertama yang harus diperhatikan adalah torsi motor yang dihasilkan dapat beroperasi (Dubey, 2001). Operasi empat kuadran, seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas, menunjukkan beberapa kategori operasi motor. Ketika torsi dan putaran bernilai positif maka motor beroperasi secara *forward motoring* (bergerak maju), sebaliknya jika bernilai negatif maka motor beroperasi secara *reverse motoring* (bergerak mundur). Bila torsi motor bernilai positif dan putaran motor bernilai negatif, maka motor ini bekerja secara *forward braking* (pengereman maju). Sedangkan bila torsi motor bernilai negatif dan putaran motor bernilai positif, maka motor ini bekerja secara *reverse braking*. Pengereman pada operasi multi kuadran ini dilakukan secara elektrik atau dinamakan pengereman elektrik (*electric braking*).

2.7. Pengereman Elektrik

Terdapat tiga jenis pengereman elektrik, yaitu pengereman regeneratif (*regenerative braking*), pengereman rheostat (*rheostatic braking*), dan pengereman arus balik (*reverse current braking* atau *plugging*) (Pillai, 1989).

Ketika motor melakukan *braking* (pengereman), maka motor bekerja sebagai generator (Pillai, 1989). Hal ini mengartikan bahwa aliran daya yang sebelumnya menuju motor, sekarang aliran daya menjadi menuju suplai daya. Jenis pengereman

ini dinamakan pengereman regeneratif (*regenerative braking*). Dengan, pengereman ini penghematan daya untuk pengereman dapat mencapai 8%-25% (Yoong, et al., 2010).

Pengereman rheostat hampir sama seperti pengereman regeneratif. Perbedaannya terletak pada pengiriman daya pengereman. Bila daya pengereman pada pengereman regeneratif dikirimkan kembali ke suplai daya, pada pengereman rheostat daya dikirimkan ke resistansi kumparan mesin atau resistor eksternal yang dikoneksikan sebagai beban pada saat motor beroperasi sebagai generator (Pillai, 1989). Daya listrik yang dikirimkan ke resistansi kumparan atau resistor eksternal tersebut kemudian terdisipasi menjadi panas.

Pengereman arus balik dilakukan dengan cara mengubah koneksi suplai daya dan motor sehingga motor akan berusaha untuk beroperasi dengan arah yang berlawanan dari arah operasi semula. Hal tersebut menyebabkan motor tersebut akan berakselerasi untuk arah yang berlawanan atau deakselerasi (Pillai, 1989). Pengereman ini adalah jenis pengereman elektrik yang paling tidak efektif, karena daya yang dikirimkan untuk pengereman akan terbuang. Namun, pengereman ini dapat menghentikan putaran motor dengan cepat.

2.8. Baterai *Lead-Acid*

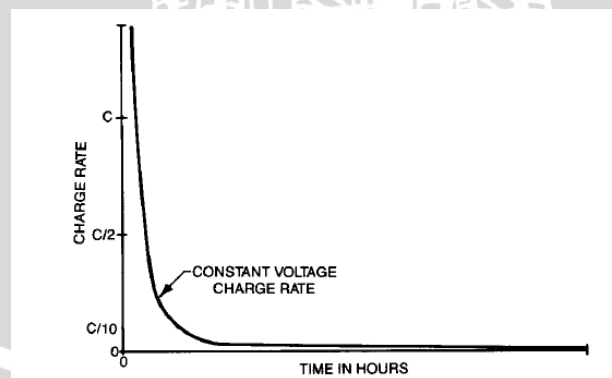
Pada tahun 1801, seorang fisikawan Prancis, N. Gautherot, menghubungkan dua elektroda dari sel Volta ke dua kabel platinum yang dilapisi larutan *saline*. Air kemudian terdekomposisi menjadi hidrogen dan oksigen, dan ketika rangkaian dibuka dan kabel platinum itu dihubungkan satu sama lain, arus listrik mengalir pada arah yang berlawanan untuk waktu yang singkat. Setahun kemudian di Jerman, Johann Ritter menghubungkan sel Volta ke piringan-piringan tembaga dan dilapisi dengan larutan NaCl. Tegangan *charging*-nya adalah 1,3 V. Setelah rangkaian dihubungkan, tegangan 0,3 V terukur di antara kedua piringan tersebut. (Pavlov, 2011)

Setelah perang dunia kedua, produksi baterai *lead-acid* meningkat secara pesat. Hal ini sejalan dengan perkembangan transportasi, industri telekomunikasi, dan kebutuhan penyimpanan energy yang juga meningkat secara pesat. Menurut

aplikasinya, baterai *lead-acid* dapat diklasifikasikan menjadi tipe-tipe ini (Pavlov, 2011):

1. Baterai SLI (*starting, lighting, ignition*) yang digunakan pada kendaraan.
2. *Stationary battery* yang sering digunakan untuk sumber daya cadangan.
3. *Motive power battery* adalah baterai industri yang digunakan untuk sumber energy beberapa kendaraan listrik.
4. *Special purpose battery* yang dikhususkan untuk penggunaan pada pesawat terbang, kapal selam, dan peralatan militer khusus.

Terdapat dua metode umum *charging*, yaitu *constant voltage charging* dan *constant current charging* (Gates Energy Products, 1998). Diantara kedua cara tersebut mempunyai keunggulan dan kelemahan masing-masing. Untuk *constant voltage charging*, tegangan *charging* dibuat konstan di atas tegangan baterai. Metode memberikan pembatas arus alami, sehingga baterai tidak mengalami *overcharge* (Gates Energy Products, 1998). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.12, ketika *charging* tegangan baterai akan naik secara bertahap sampai mencapai tegangan nominal baterai tersebut. Ketika tegangan baterai naik, maka arus akan berkurang sampai bernilai nol pada saat tegangan *charging* sama dengan atau lebih kecil dari tegangan baterai. Metode *constant current charging* membutuhkan pembatas arus untuk membatasi arus masukan baterai agar tidak terjadi *overcharge*.

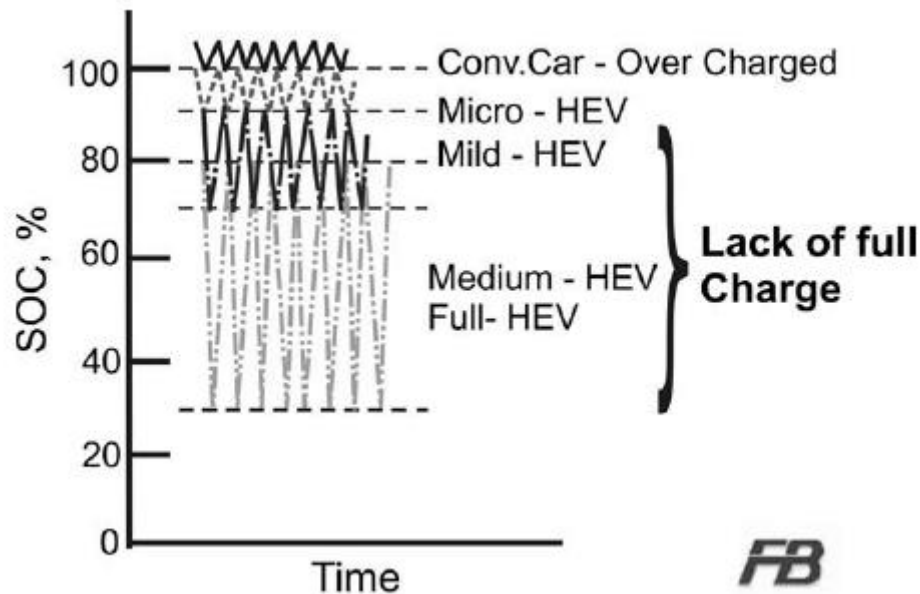


Gambar 2.12 Arus fungsi waktu untuk *constant-voltage charger*

Sumber: Gates Energy Products (1998: 187)

Karena pada penelitian ini baterai diperlakukan sebagai sumber energi penggerak motor elektrik, sehingga jenis baterai yang digunakan adalah baterai HEV. Baterai HEV merupakan jenis baterai untuk penggerak motor elektrik. HEV

merupakan baterai *lead-acid* yang diciptakan untuk sumber energi kendaraan *hybrid* (motor bakar dan motor listrik) (Pavlov, 2011). Untuk baterai HEV sendiri terdiri dari empat jenis, yaitu: *Full HEV*, *Mild HEV*, *Micro HEV*, dan *Plug-in HEV*. Dari keempat jenis baterai HEV itu, masing-masing mempunyai SOC² (*State of Charge*) yang berbeda-beda. SOC dari masing-masing jenis baterai HEV ditunjukkan dalam Gambar 2.13.



Gambar 2.13 SOC dari empat baterai HEV

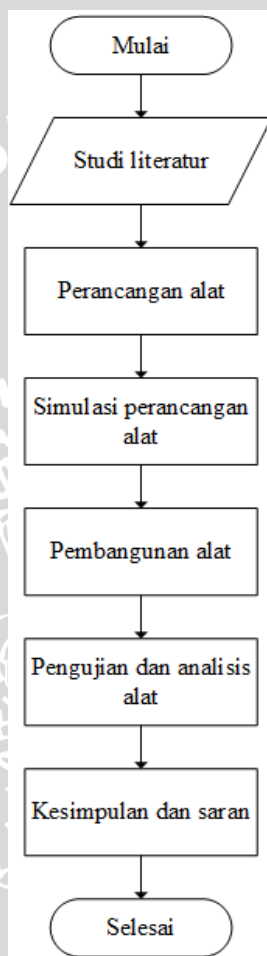
Sumber: Pavlov (2011, 24)

² SOC merupakan satuan yang setara untuk pengukuran bahan bakar pada baterai HEV (Pavlov, 2011)

BAB III

METODE PENELITIAN

Secara umum metode penelitian dalam rancang bangun sistem pengendalian dua kuadran motor dc arus searah magnet permanen menggunakan *dc chopper* ditunjukkan dalam Gambar 3.1.



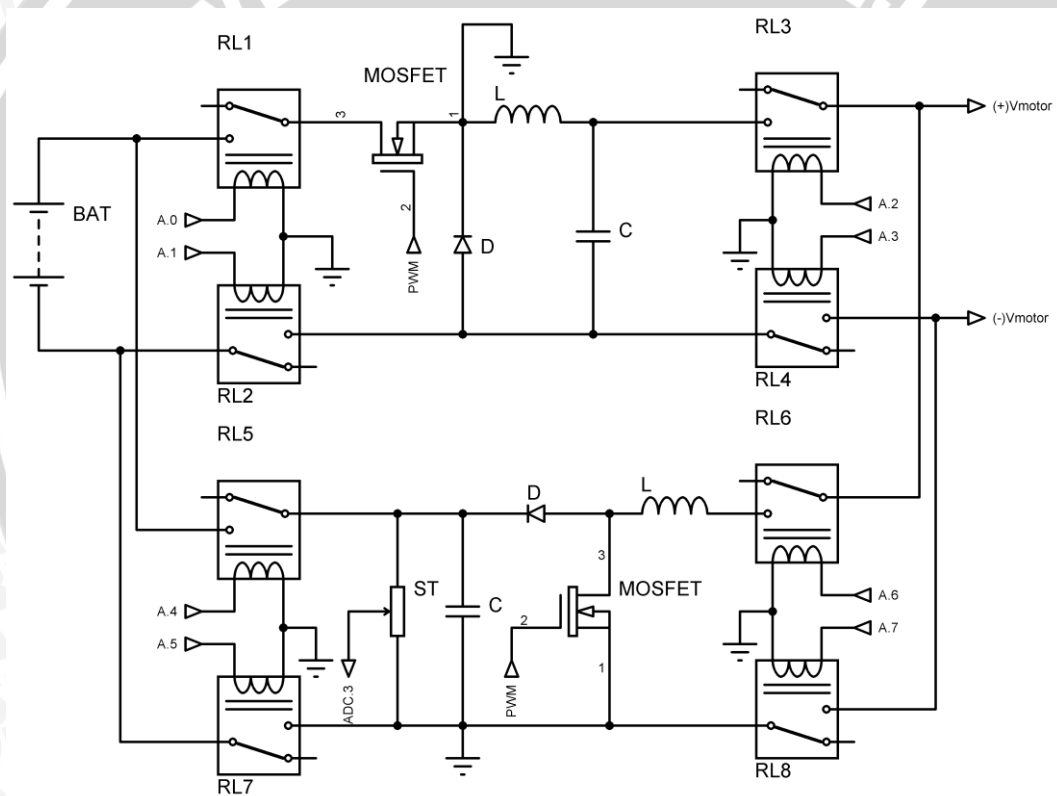
Gambar 3.1 Diagram alur metode penelitian

3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan kajian pustaka dari berbagai sumber yang sesuai dengan judul penelitian. Kajian tersebut meliputi prinsip kerja motor *dc shunt*, prinsip kerja *boost converter* dan *buck converter*, perancangan rangkaian picu, teori yang digunakan dalam perancangan brushless exciter seperti mikrokontroler AVR, sensor tegangan, dan semikonduktor daya.

3.2. Perancangan Alat

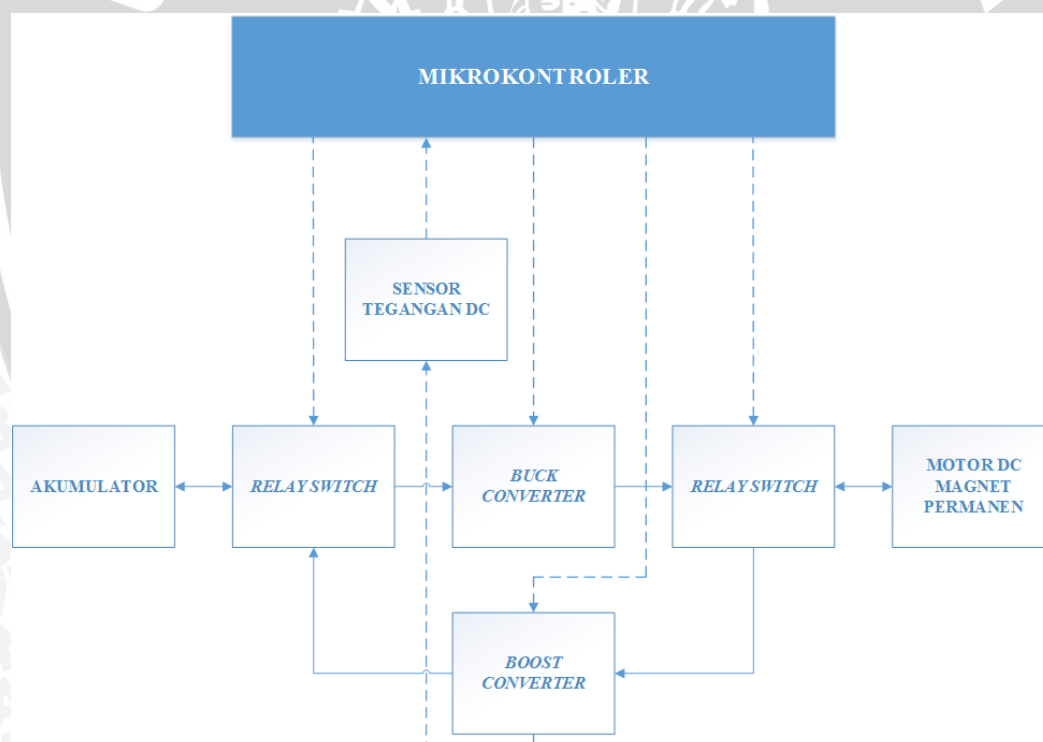
Terdapat lima tahap perancangan alat. Tahap pertama adalah perancangan sistem, yang meliputi perancangan blok diagram dan sistem secara keseluruhan. Tahap kedua adalah pengujian motor dc magnet permanen yang akan digunakan sebagai penggerak utama. Tahap ketiga adalah perancangan *buck converter*. Tahap keempat adalah perancangan *boost converter*. Tahap kelima adalah perancangan rangkaian picu, yang terdiri dari perancangan minimum system mikrokontroler dan pemrogramannya. Tahap yang terakhir adalah perancangan sensor tegangan sebagai umpan balik untuk *boost converter*.



Gambar 3.2 Rangkaian sistem secara keseluruhan

Tujuan dari terdapatnya pengujian motor arus searah magnet permanen pada perancangan ini adalah untuk mengetahui parameter-parameter dari motor itu sendiri. Parameter-parameter ini sendiri berguna untuk perancangan dan simulasi ke depannya.

Sistem operasi dua kuadran ini dirancang dengan menggunakan dua buah konverter daya *dc chopper*, yaitu *buck converter* dan *boost converter*. Pada operasi dua kuadran ini jenis pengereman elektrik yang digunakan adalah pengereman regeneratif. *Buck converter* digunakan pada saat mode *mode motoring*, dan *boost converter* digunakan pada saat *braking*. Prinsip pengecasan akumulator yang digunakan pada saat *braking* adalah *constant voltage*. Dengan menggunakan prinsip *constant voltage* diharapkan arus dan tegangan yang menuju baterai pada saat pengereman konstan. Rangkaian keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 3.2, sedangkan blok diagram sistem ini dapat dilihat pada Gambar 3.3. Pada blok diagram ini garis tidak putus-putus merupakan arah daya, sedangkan pada garis putus-putus merupakan sinyal kontrol. *Relay switch* digunakan untuk mengganti jalur dari *buck converter* ke *boost converter*, maupun sebaliknya. Sistem ini secara keseluruhan dikontrol oleh mikrokontroler.



Gambar 3.3 Diagram blok sistem

3.2.1. Penentuan Motor Arus Searah Magnet Permanen dan Baterai

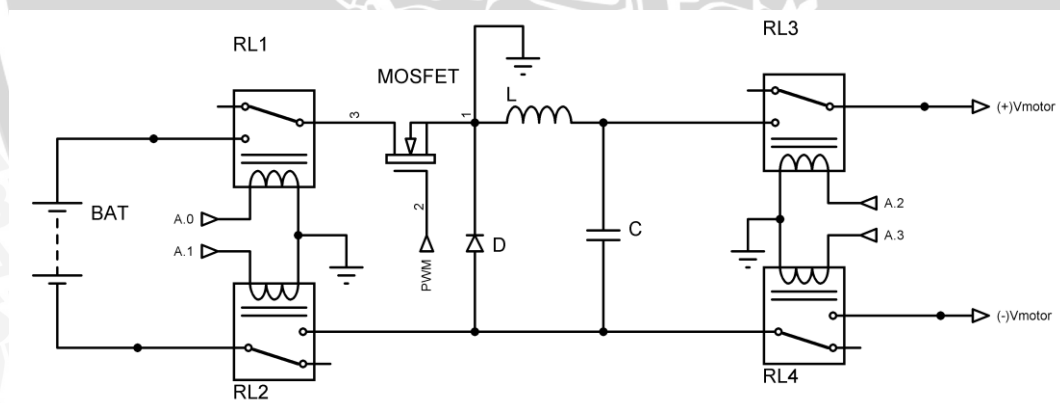
Disini akan dibahas tentang penentuan kapasitas dari motor arus searah magnet permanen dan baterai. Baterai ditentukan berdasarkan tegangan nominal motor yang tertera pada *nameplate*-nya.

3.2.2. Rangkaian Picu

Disini akan dibahas tentang sistem minimum mikrokontroler serta perangkat lunaknya. Mikrokontroler ini akan mengontrol antara lain pergantian mode sistem pada rele, *duty cycle* pada *buck converter* dan *boost converter*, serta pembacaan sensor tegangan. Pada pemrogramannya, untuk mode *motoring* diprogram secara *loop* terbuka, sedangkan untuk mode *braking* diprogram secara *loop* tertutup.

3.2.3. Buck Converter

Buck converter ini dirancang untuk beroperasi pada mode *motoring*. Sumber tegangan pada *buck converter* ini adalah baterai dan bebannya adalah motor. L dan C dirancang untuk memastikan bahwa arus keluaran *buck converter* ini kontinyu. Skematik konverter daya ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.

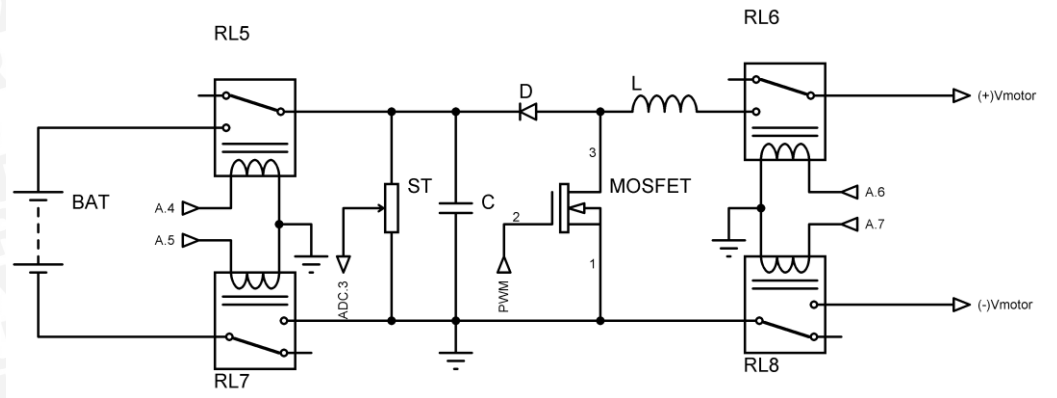


Gambar 3.4 Skematik *buck converter*

3.2.4. Boost Converter

Boost converter ini dirancang untuk beroperasi pada mode *braking*. Sumber tegangan dan beban pada *boost converter* ini berbeda dengan *buck converter*, yaitu untuk sumber tegangan adalah motor yang beroperasi sebagai generator dan beban adalah baterai. L dan C dirancang untuk memastikan bahwa arus masukan dan

keluaran *boost converter* ini kontinu. Skematik konverter daya ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skematik *boost converter*

3.2.5. Sensor Tegangan

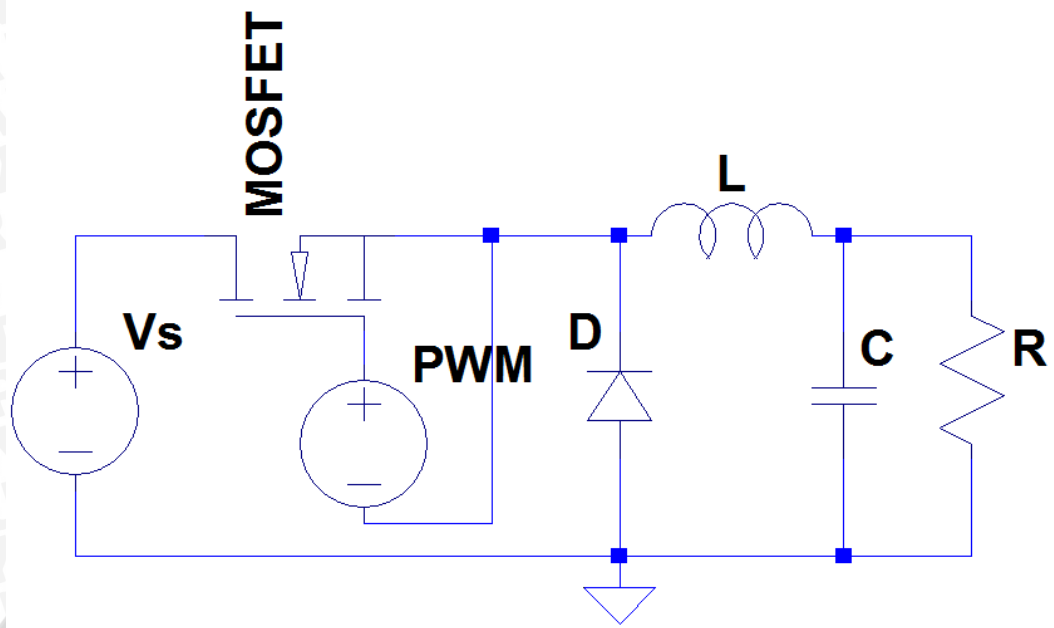
Sensor tegangan ini dapat dilihat pada komponen yang berlabel ST yang ditunjukkan Gambar 3.5. Sensor tegangan ini berfungsi untuk membaca keluaran *boost converter* yang kemudian akan dikirimkan berupa data analog ke pembacaan ADC mikrokontroler.

3.3. Simulasi Perancangan Alat

Tujuan dari simulasi pada penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja rangkaian konverter daya, yaitu *buck converter* dan *boost converter* sebelum dibuat. Data dari simulasi ini juga akan digunakan sebagai acuan untuk menentukan *error* hasil pengujian. Simulasi ini menggunakan *freeware* LTspice IV.

3.3.1. Simulasi *Buck Converter*

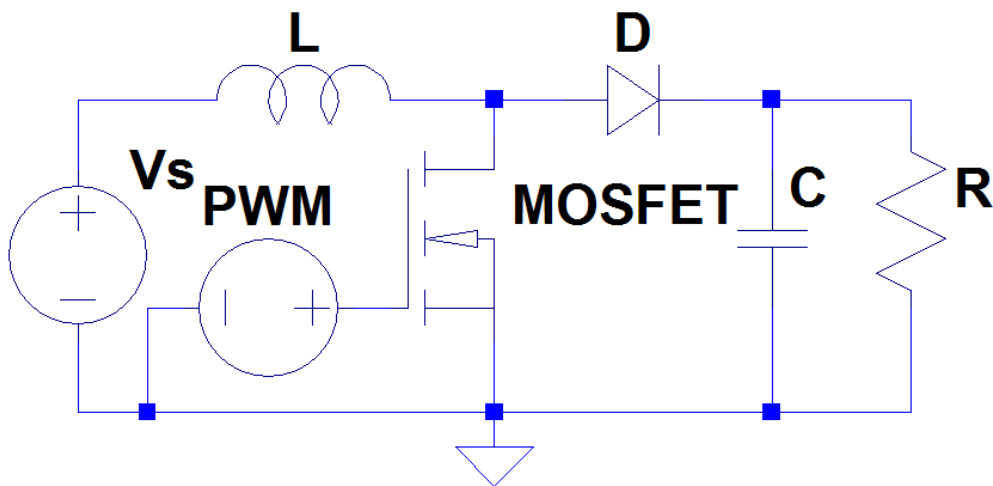
Tujuan dari Simulasi ini bertujuan untuk memprediksi kinerja dari *buck converter* sebelum pembuatan dan kesesuaian perancangannya. Skematik diagram simulasi *buck converter* ini dapat dilihat pada Gambar 3.6. Nilai-nilai komponen aktif dan pasif akan ditentukan sesuai perhitungan pada perancangan.



Gambar 3.6 Skematik diagram simulasi *buck converter*

3.3.2. Simulasi *Boost Converter*

Simulasi ini bertujuan untuk memprediksi kinerja dari *boost converter* sebelum pembuatan. Skematik diagram simulasi *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 3.7. Nilai-nilai komponen aktif dan pasif akan ditentukan sesuai perhitungan dan perancangan.



Gambar 3.7 Skematik diagram simulasi *boost converter*

3.4. Pengujian dan Analisis

Pengujian dan analisis diperlukan untuk menentukan kinerja dari sistem pengendalian putaran dua kuadran ini. Pada penelitian ini, pengujian terdiri empat pengujian, yaitu pengujian *buck converter*, pengujian *boost converter*, pengujian rangkaian picu, dan pengujian sistem.

3.4.1. Pengujian Rangkaian Picu

Pengujian rangkaian picu ini dilakukan untuk mengetahui *error* antara *duty cycle* yang ditampilkan di LCD dan *duty cycle* sebenarnya. Bila *error* kurang dari 10% maka rangkaian picu dianggap berhasil.

3.4.2. Pengujian Buck Converter

Tujuan dari pengujian *buck converter* ini adalah untuk mengetahui kinerja dari *buck converter* bila berbeban. Dari pengujian ini juga menunjukkan data efisiensi *buck converter*.

3.4.3. Pengujian Boost Converter Tanpa Umpan Balik

Tujuan dari pengujian *boost converter* tanpa umpan balik ini adalah untuk mengetahui kinerja dari *boost converter* serta karakteristiknya. Data dari pengujian ini juga menunjukkan data efisiensi *boost converter*.

3.4.4. Pengujian Boost Converter Dengan Umpan Balik

Tujuan dari pengujian *boost converter* dengan umpan balik adalah untuk mengetahui efek dari perubahan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran *boost converter* pada saat *boost converter* ini dioperasikan pada keadaan *loop* tertutup.

3.4.5. Pengujian Sistem *Motoring*

Pengujian sistem *motoring* dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem ini saat mode *motoring*, yaitu untuk mencari putaran fungsi dari *duty cycle*. Data tegangan masukan dan keluaran, serta arus masukan dan keluaran juga diukur pada pengujian ini.

3.4.6. Pengujian Sistem *Braking*

Pengujian *braking* dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem ini saat mode *braking*, yaitu seberapa lama waktu yang dibutuhkan motor untuk berhenti dengan menggunakan pengereman regeneratif. Data tegangan masukan dan keluaran, serta arus masukan dan keluaran juga diukur pada pengujian ini.

3.5. Pembuatan Alat

Pembuatan alat dilakukan dengan mengacu pada hasil perancangan dan simulasi alat. Pembuatan alat ini hanya akan dilakukan pada sistem pengendalian, sedangkan pada motor yang digunakan pada penelitian ini tidak dilakukan perubahan. *Rotary encoder* pada motor tidak digunakan karena pada perancangan sistem motoring memakai sistem pengendalian *open loop*.

3.6. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan diambil berdasarkan teori, hasil perhitungan dan analisis, terutama hasil saat pengujian sistem. Kesimpulan ini ditarik berdasarkan kinerja bagian-bagian dari alat. Saran diberikan untuk memberikan masukan kepada pembaca yang akan meneliti lebih lanjut mengenai topik skripsi ini. Saran diberikan berdasarkan kesulitan-kesulitan yang dialami selama penelitian dan hal-hal lain yang perlu dikaji lebih mendalam.

BAB IV PERANCANGAN ALAT

4.1. Penentuan Motor Arus Searah Magnet Permanen dan Baterai

Pada penelitian ini, motor dc magnet permanen digunakan sebagai penggerak utama. Motor dc magnet permanen beban mekanik pada porosnya, agar motor ini mempunyai inersia yang cukup untuk pengereman. Pada penelitian ini, motor dc magnet permanen yang digunakan adalah motor arus searah merk Hitachi tipe D06D304E. Pada motor ini diberi beban mekanik berupa piringan besi bermassa 82,3 gram.

4.1.1. Nameplate Motor

Tipe	D06D304E		
Tegangan	38 V	Daya	53 W
Arus	1,9 A		
Putaran	3700 rpm	Kelas Isolator	B

4.1.2. Pengukuran Resistansi dan Induktansi Jangkar Motor

Pada pengukuran langsung dengan menggunakan rlc meter didapatkan nilai resistansi jangkar sebesar 2,3 Ω dan nilai induktansi jangkar sebesar 22,8 mH.

4.1.3. Baterai

Pada perancangan ini ditetapkan baterai yang digunakan adalah akumulator 12 V. Pada *nameplate* motor diketahui bahwa tegangan nominal motor adalah 38 V, sehingga pada perancangan ini menggunakan seri tiga akumulator atau sama dengan baterai 36 V.

4.2. Rangkaian Picu

Komponen utama rangkaian picu ini adalah mikrokontroler. Mikrokontroler digunakan untuk mengontrol *duty cycle* pada *buck converter* dan *boost converter*.

Dalam perancangan ini pengendalian yang digunakan adalah *open loop* dan *closed loop*. Pengendalian *open loop* digunakan pada saat mode *motoring*, sedangkan pengendalian *closed loop* digunakan pada saat mode *braking*.

Duty cycle pada saat mode *motoring* dikendalikan oleh potensiometer melalui metode pembagian tegangan. Semakin besar nilai resistansi pada potensiometer, maka akan semakin kecil level tegangan yang dibaca mikrokontroler. Pembacaan tegangan pada mikrokontroler menggunakan ADC. Setelah level tegangan dibaca, maka data akan diolah menjadi *duty cycle* yang nantinya akan mengendalikan *trigger* (picu) dari *buck converter*.

Duty cycle pada saat mode *braking* dikendalikan oleh sensor tegangan yang akan dibaca oleh ADC mikrokontroler ini. Bila pembacaan nilai sensor tegangan lebih rendah dari *set point*, maka *duty cycle* akan bertambah. Bila pembacaan nilai sensor tegangan lebih besar dari *set point*, maka *duty cycle* akan berkurang.

Bahasa yang digunakan untuk memrogram mikrokontroler Atmel AVR adalah bahasa C. Alasan pemilihan Atmel AVR adalah fleksibilitas komponen ini untuk diprogram dan juga harganya yang relatif murah. Alasan lainnya adalah karena fitur Mikrokontroler Atmel AVR yang lengkap.

4.2.1. Sistem Minimum Mikrokontroler

Sistem minimum adalah rangkaian minimum yang dibutuhkan suatu mikrokontroler untuk dapat bekerja. Dalam perancangan ini sistem minimum sudah terintegrasi dengan *downloader* dan ATmega16 yang dibuat oleh SFE Electronics seperti pada Gambar 4.1.



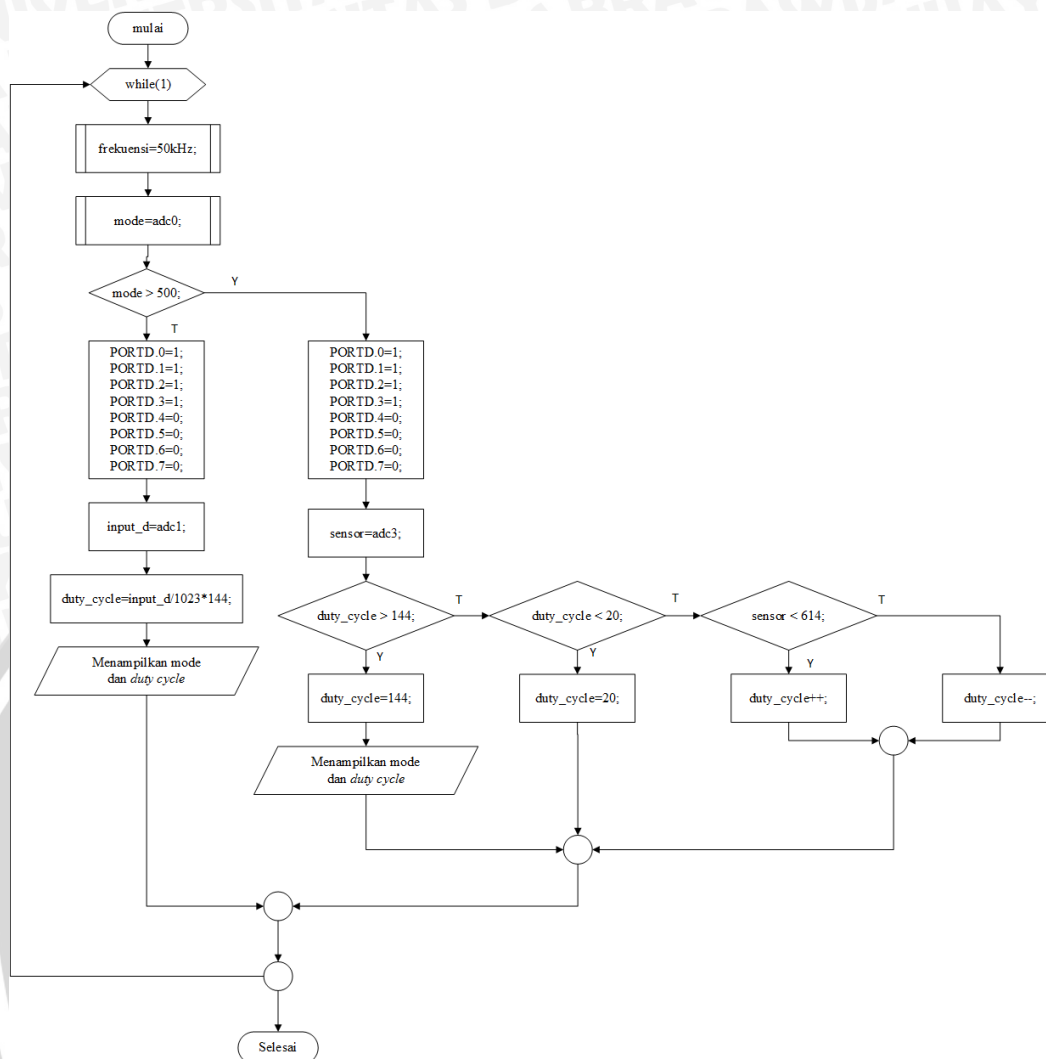
Gambar 4.1 SFE ATMEGA16 *Minimum System Integrated with USBAsp*
Sumber: www.sfe-electronics.com

4.2.2. Perangkat Lunak Mikrokontroler

Port dan pin serta variabel yang akan digunakan pada perancangan perangkat lunak adalah sebagai berikut:

1. ADC diatur 10bit.
2. Potensiometer di Pin ADC0.
3. Potensiometer di Pin ADC1.
4. Keluaran sensor tegangan ke Pin ADC3.
5. Pulsa picu pada PORT C.
6. Data LCD pada PORT B.
7. Kontrol rele pada PORT D.
8. Pulsa picu menggunakan Timer1 dan diinterupsi pada Compare A Match.
9. mode adalah variable mode sistem.
10. input_d adalah masukan potensiometer.
11. sensor adalah masukan sensor tegangan.
12. duty_cycle adalah besar waktu nyala pulsa picu.

Diagram alir perangkat lunak ini dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram alir perangkat lunak rangkaian picu

Mode pada perancangan ini ditentukan oleh besar pembacaan Pin ADC0 yang dikendalikan oleh potensiometer. Bila ADC0 bernilai di atas 500, maka mode operasi sistem ini adalah *motoring*. Sebaliknya bila ADC0 bernilai di bawah 500, maka mode operasi sistem ini adalah *braking*.

PORT D pada perancangan ini berfungsi sebagai kontrol rele. Bila mode sistem ini adalah *motoring*, maka PORT D 0 sampai dengan PORT D 3 akan menyala dan PORT D 4 sampai dengan 7 akan mati. Sebaliknya bila mode sistem ini adalah *braking*, maka PORT D 0 sampai dengan PORT D 3 akan mati dan PORT D 4 sampai dengan 7 akan nyala.

Duty cycle pada mode *motoring* dikendalikan oleh potensiometer pada Pin ADC1. Sedangkan *duty cycle* pada mode *braking* dikendalikan oleh pembacaan



sensor tegangan pada Pin ADC3. Bila pembacaan ADC3 bernilai di bawah 614, maka nilai waktu nyala akan dinaikkan. Bila pembacaan ADC3 bernilai di atas 614, maka nilai waktu nyala akan diturunkan. Nilai waktu nyala pada mode perancangan ini dibatasi antara 20 dan 144, atau *duty cycle* 10% dan 90%.

Data layar LCD akan dikendalikan oleh PORT B. Pada layar LCD akan ditampilkan nilai *duty cycle* dalam persen dan mode operasi sistem ini. Pada saat penyalan awal sistem, LCD akan menampilkan nama dan nomer induk mahasiswa penulis selama 500 ms.

4.3. Buck Converter

Rangkaian *buck converter* terdiri dari MOSFET dan dioda *fast switching*. Alasan pemilihan MOSFET adalah kemampuan komponen ini untuk bekerja dalam frekuensi *switching* dan daya yang besar, serta harga komponen ini yang terjangkau. Fungsi MOSFET adalah untuk saklar elektronik. Penentuan parameter *buck converter* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Penentuan parameter perancangan *buck converter*

No.	Penentuan Parameter	Keterangan
1.	V_s (Tegangan masukan) = 36 V	
2.	V_o (Tegangan keluaran) = 4V – 32V	
3.	D (<i>Duty cycle</i>) = 10% – 90%	
4.	$f_{switching}$ = 50 kHz	
5.	$(\Delta V_o/V_o) \leq 10\%$	Untuk meningkatkan jangkauan nilai putaran motor
6.	$(L/L_{min}) \approx 125\%$	Kebanyakan perancang memilih induktansi 25% lebih besar dari nilai induktansi minimal (Hart, 2011)

Sebelum mencari nilai-nilai komponen *buck converter* ini, perlu dicari nilai resistansi pengganti dari beban ini. Nilai resistansi pengganti dapat dicari dari membagi tegangan nominal motor dengan arus nominalnya, karena beban

konverter ini adalah motor arus searah magnet permanen. Jadi nilai resistansi pengganti beban adalah:

$$R = \frac{V_{nom}}{I_{nom}} = \frac{38}{1,9} = 20\Omega \quad (4.1)$$

Dari Tabel 4.1 dapat dicari nilai dari induktor dan kapasitor *buck converter* ini. Pertama, nilai induktor dicari dengan mencari nilai L_{min} (induktansi minimal) terlebih dahulu. Nilai induktansi minimal dan induktansi *buck converter* pada *duty cycle* 10 % dapat dicari dengan:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0,1)20}{2 \times 50000} = 180 \mu H \quad (4.2)$$

$$L = 125\% \times L_{min} = 1,25 \times 180 = 225 \mu H \quad (4.3)$$

Sedangkan, induktansi minimal dan induktansi *buck converter* pada *duty cycle* 90% dapat dicari dengan:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0,9)20}{2 \times 50000} = 20 \mu H \quad (4.4)$$

$$L = 125\% \times L_{min} = 1,25 \times 20 = 25 \mu H \quad (4.5)$$

Sehingga, pada perancangan *buck converter* ini nilai L dipilih mendekati 225 μH , yaitu 220 μH .

Untuk menentukan rating induktor, terlebih dahulu dicari nilai I_L (arus yang melewati induktor). Nilai I_L pada *duty cycle* 10% adalah :

$$I_L = \frac{V_s \times D}{R} = \frac{36 \times 0,1}{20} = 0,18 A \quad (4.6)$$

Sedangkan, nilai I_L pada *duty cycle* 90% adalah:

$$I_L = \frac{V_s \times D}{R} = \frac{36 \times 0,9}{20} = 1,62 A \quad (4.7)$$

Sehingga, pada perancangan ini dipilih nilai induktor dengan rating arus lebih dari 1,62 A.

Langkah kedua adalah menentukan nilai kapasitor. Nilai kapasitor pada *duty cycle* 10% adalah:

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} = \frac{1-0,1}{8 \times 220 \times 10^{-6} \times 0,1 \times 50000^2} = 2,05 \mu F \quad (4.8)$$

Sedangkan, nilai kapasitor pada *duty cycle* 90% adalah

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} = \frac{1-0,9}{8 \times 220 \times 10^{-6} \times 0,1 \times 50000^2} = 227,27 nF \quad (4.9)$$

Jadi nilai kapasitor dipilih lebih besar dari 2,05 μF , yaitu sebesar 4,7 μF .

Nilai dari I_s (arus masukan) pada *duty cycle* 10% dapat dicari dengan:

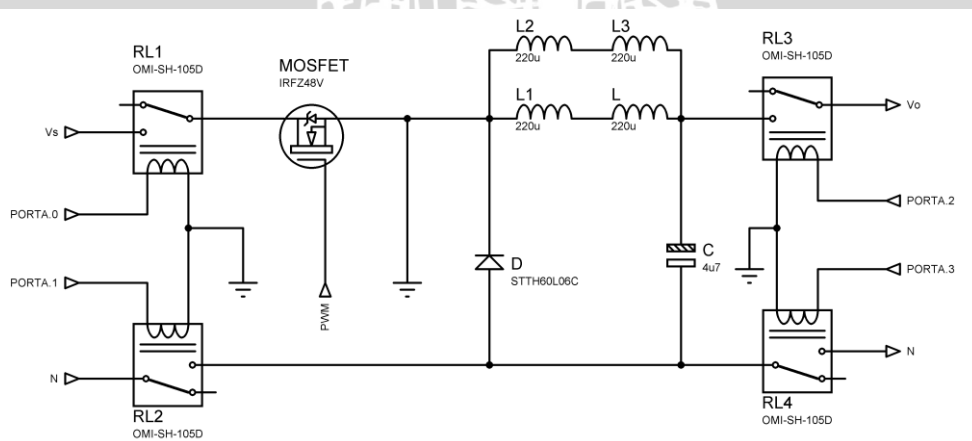
$$I_s = D \times I_o = 0,1 \times 0,18 = 18 \text{ mA} \quad (4.10)$$

Sedangkan, nilai I_s pada *duty cycle* 90% adalah:

$$I_s = D \times I_o = 0,9 \times 1,62 = 1,46 \text{ A} \quad (4.11)$$

Pada perancangan ini MOSFET yang digunakan adalah MOSFET kanal n. MOSFET kanal n memerlukan tegangan *gate-source* (V_{GS}) positif untuk menyalakannya, tegangan *gate-source* nol untuk memadamkannya. Sehingga, *port* pulsa dari rangkaian picu dihubungkan ke *gate* MOSFET, sedangkan *ground* rangkaian picu dihubungkan ke *source* MOSFET. MOSFET yang dipilih pada perancangan ini adalah MOSFET yang memiliki nilai *rating* tegangan sebesar 150% dari V_s (tegangan masukan), yaitu lebih dari 54 V. Sedangkan, nilai *rating* arusnya lebih dari 300% (150% x 200%) dari arus masukan, yaitu 4,38 A. Menurut *rating-rating* tersebut maka MOSFET yang dipilih adalah IRFZ48V.

Dioda sebagai *free wheeling* adalah *fast switching diode*. Dioda *fast switching* mempunyai *reverse recovery time* yang kecil sehingga dapat digunakan pada frekuensi pensaklaran yang tinggi. Pada perancangan ini dioda yang dipilih adalah STTH60L0C. Rele yang digunakan pada perancangan ini adalah rele SPDT 5V. Sumber daya rele diambil dari catu daya minimum sistem mikrokontroler. Diagram skematik rangkaian *buck converter* ini dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Diagram skematik perancangan *buck converter*

Tabel 4.2 Komponen *buck converter*

No.	Nama komponen	Jumlah	Keterangan
1.	Induktor daya 220 uF 1,4 A	4	
2.	Kapasitor elektrolit 4,7 uF 50V	1	
3.	MOSFET IRFZ48V	1	
4.	Dioda STTH60L0C	1	
5.	Rele SPDT 5 V	4	

4.4. Boost Converter

Rangkaian *boost converter* terdiri dari MOSFET, dioda *fast switching*, induktor, dan kapasitor. Alasan pemilihan MOSFET adalah kemampuan komponen ini untuk bekerja dalam frekuensi *switching* dan daya yang besar, serta harga komponen ini yang terjangkau. Fungsi MOSFET adalah untuk saklar elektronik. Diagram skematik rangkaian *boost converter* ini dapat dilihat pada Gambar 4.4. Penentuan parameter-parameter *boost converter* ini dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Penentuan parameter perancangan *boost converter*

No.	Penentuan Parameter	Keterangan
1.	V_S (Tegangan masukan) = 5 V – 32 V	
2.	V_o (Tegangan keluaran) = 36 V	
3.	D (<i>Duty cycle</i>) = 10% – 90%	
4.	$f_{switching} = 50$ kHz	
5.	$(\Delta V_o/V_o) \leq 0,1$ %	untuk membuat tegangan keluaran mendekati dc murni
6.	$\Delta I_L \leq 75\%$	untuk memastikan arus yang melewati induktor kontinyu

Sebelum mencari nilai-nilai komponen *boost converter* ini, perlu dicari nilai resistansi pengganti dari bebannya. Nilai resistansi pengganti dapat dicari dari membagi tegangan keluaran *boost converter* dengan arus baterainya, karena beban konverter ini adalah baterai. Arus baterai dapat dicari dengan membagi selisih antara tegangan *boost converter* dan tegangan terkecil baterai dengan resistansi

dalam baterai. Resistansi dalam baterai adalah $30,79 \Omega$ dan tegangan terkecilnya adalah $32,12 \text{ V}$. Jadi nilai resistansi pengganti beban adalah:

$$I_{bat} = \frac{V_o - V_{bat}}{R_{bat}} = \frac{36 - 32,12}{30,79} = 0,126 \text{ A} \quad (4.12)$$

$$R = \frac{V_o}{I_{bat}} = \frac{36}{0,126} = 285,71 \Omega \approx 300 \Omega \quad (4.13)$$

Nilai kapasitor *boost converter* ini pada *duty cycle* 10% dapat dicari dengan persamaan:

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} = \frac{0,1}{300 \times 0,1\% \times 50000} = 6,67 \mu\text{F} \quad (4.14)$$

Nilai kapasitor *boost converter* ini pada *duty cycle* 90% adalah:

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f} = \frac{0,9}{300 \times 0,1\% \times 50000} = 60 \mu\text{F} \quad (4.15)$$

Sehingga, nilai kapasitor dipilih $100 \mu\text{F}$ dimana sesuai dengan nilai standar kapasitor untuk *boost converter* pada arus sebesar $0 - 300 \text{ mA}$ (Torex Semiconductor Ltd., 2008).

Nilai I_L (arus yang melewati induktor) pada *duty cycle* 10% dapat dicari dengan persamaan:

$$I_L = \frac{V_o^2}{V_S R} = \frac{36^2}{32 \times 300} = 0,135 \text{ A} \quad (4.16)$$

$$\Delta I_L = 75\% \times I_L = 0,75 \times 0,135 = 0,101 \text{ A} \quad (4.17)$$

Nilai induktor *boost converter* ini pada *duty cycle* 10% dapat dicari dengan persamaan:

$$L = \frac{V_S D}{\Delta I_L f} = \frac{5 \times 0,1}{0,101 \times 50000} = 99,01 \mu\text{F} \quad (4.18)$$

Nilai I_L (arus yang melewati induktor) pada *duty cycle* 90% dapat dicari dengan persamaan:

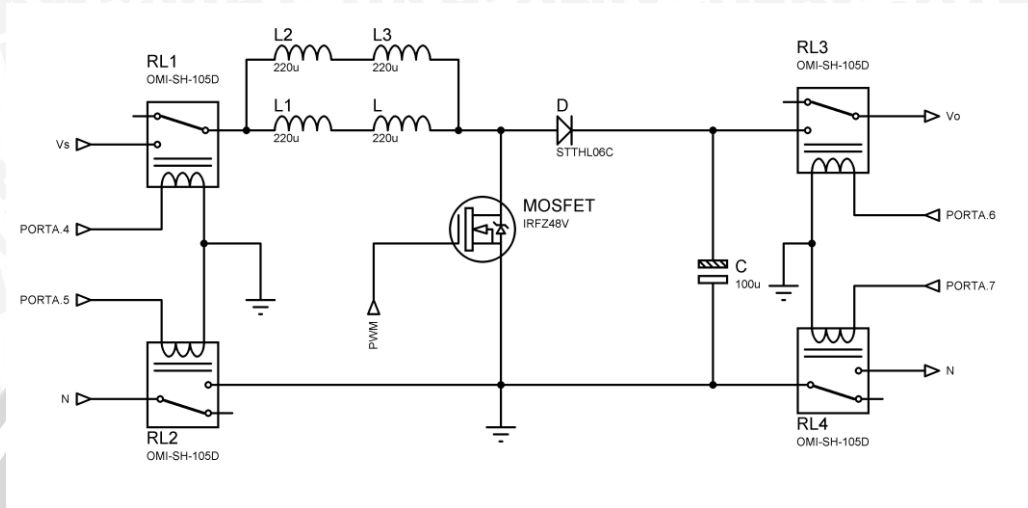
$$I_L = \frac{V_o^2}{V_S R} = \frac{36^2}{5 \times 300} = 0,846 \text{ A} \quad (4.19)$$

$$\Delta I_L = 75\% \times I_L = 0,75 \times 0,846 = 0,635 \text{ A} \quad (4.20)$$

Nilai induktor *boost converter* ini pada *duty cycle* 10% dapat dicari dengan persamaan:

$$L = \frac{V_S D}{\Delta I_L f} = \frac{5 \times 0,1}{0,635 \times 50000} = 157,48 \mu\text{F} \quad (4.21)$$

Sehingga, nilai induktor dipilih 220 μH dimana sesuai dengan nilai standar induktansi pada frekuensi *switching* sebesar 50 kHz (Torex Semiconductor Ltd., 2008).



Gambar 4.4 Diagram skematik perancangan *boost converter*

Pada perancangan ini MOSFET yang digunakan adalah MOSFET kanal n. MOSFET kanal n memerlukan tegangan *gate-source* (V_{GS}) positif untuk menyalakannya, tegangan *gate-source* nol untuk memadamkannya. Sehingga, *port* pulsa dari rangkaian picu dihubungkan ke *gate* MOSFET, sedangkan *ground* rangkaian picu dihubungkan ke *source* MOSFET yang secara bersamaan merupakan netral dari rangkaian daya. MOSFET yang dipilih pada perancangan ini adalah MOSFET yang memiliki nilai *rating* tegangan sebesar 150% dari V_s (tegangan masukan), yaitu lebih dari 54 V. Sedangkan, nilai *rating* arusnya lebih dari 400% ($200\% \times 200\%$) dari arus masukan, yaitu 3,38 A. Menurut *rating-rating* tersebut maka MOSFET yang dipilih adalah IRFZ48V.

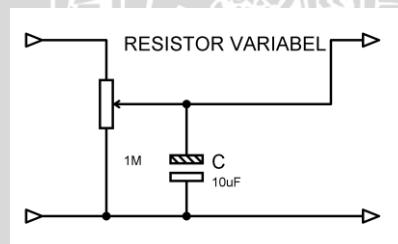
Dioda pada perancangan ini adalah *fast switching diode*. Dioda *fast switching* mempunyai *reverse recovery time* yang kecil sehingga dapat digunakan pada frekuensi pensaklaran yang tinggi. Pada perancangan ini dioda yang dipilih adalah STTH60L0C. Rele yang digunakan pada perancangan ini adalah rele SPDT 5V. Sumber daya rele diambil dari catu daya minimum sistem mikrokontroler. Diagram skematik rangkaian *buck converter* ini dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Tabel 4.4 Komponen *boost converter*

No.	Nama komponen	Jumlah	Keterangan
1.	Induktor daya 220 μ F 1,4 A	4	
2.	Kapasitor elektrolit 100 μ F 400 V	1	
3.	MOSFET IRFZ48V	1	
4.	Dioda STTH60L0C	1	
5.	Rele SPDT 5 V	4	

4.5. Sensor Tegangan

Pada perancangan ini, sensor tegangan dibuat dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Pembagi tegangan yang digunakan adalah trimpot sebesar $1M\Omega$. Pemilihan trimpot sebesar $1M\Omega$ didasari oleh meminimalisasi arus yang melewati sensor ini. Keluaran sensor akan dipasangkan ke ADC1 dan *ground* rangkaian picu. Pada sisi keluaran sensor dipasang kapasitor elektrolit sebesar 10% dari kapasitor *boost converter* yaitu 10 μ F untuk memastikan *ripple* tegangan pada pembacaan ADC stabil. Sensor tegangan diatur 3 V pada tegangan 36 V untuk perancangan ini. Diagram skematik sensor tegangan ini dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Diagram skematik perancangan sensor tegangan

BAB V

SIMULASI PERANCANGAN ALAT

5.1. Simulasi *Buck Converter*

5.1.1. Penentuan Komponen Simulasi

Skematik simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.6. Dari gambar tersebut dapat ditentukan jenis dan nilai komponen simulasi yang sesuai dengan perancangan. Penentuan jenis dan nilai komponen simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Penentuan komponen simulasi *buck converter*

No.	Komponen	Jenis	Nilai	Keterangan
1.	Vs	DC	36 V	
2.	PWM	Pulsa kotak	$V_{on} = 5V$ $T_{period} = 20 \mu s$ $T_{on} = 2 - 18 \mu s$	$f = 50 \text{ kHz}$
3.	MOSFET	IRFZ48Z		Paling mendekati IRFZ48V
4.	D	MUR460		Paling mendekati STTH60L06
5.	L	-	220 μH	
6.	C	-	4,7 μF	

5.1.2. Prosedur Simulasi

Prosedur simulasi *buck converter* adalah sebagai berikut:

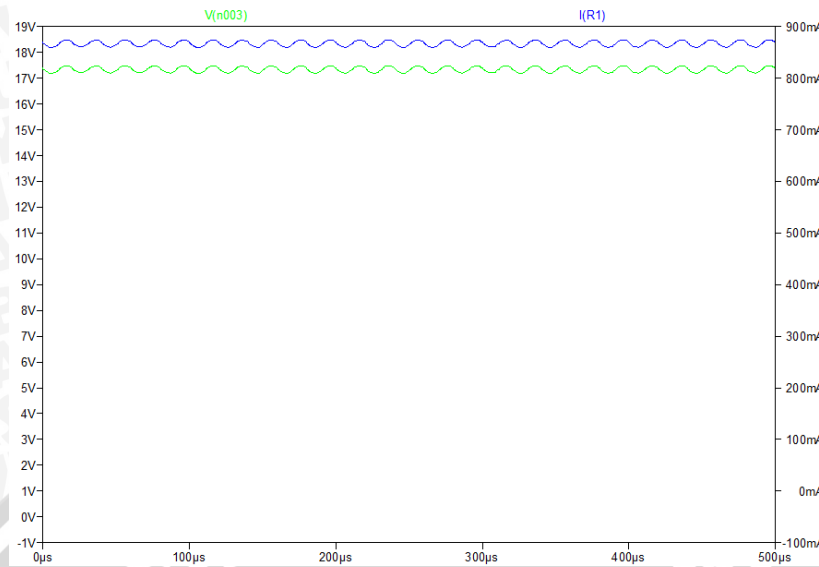
1. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
2. Ukur tegangan masukan (V_s), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran *average* dan *rms*.
3. Catat hasil pengukuran.
4. Ulangi langkah 2 sampai 4 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
5. Simpan tampilan tegangan dan arus keluaran *buck converter* pada *duty cycle* 50%.

5.1.3. Hasil Simulasi Buck Converter

Hasil simulasi *buck converter* adalah sebagai berikut:

Tabel 5.2 Hasil simulasi *buck converter*

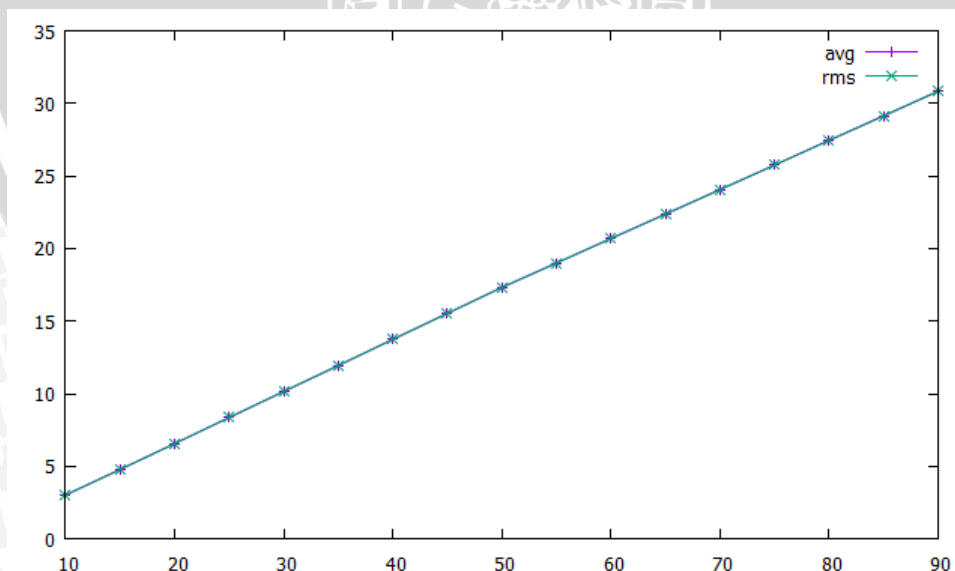
D (%)	V _s (V)		I _s (mA)		V _o (V)		I _o (mA)	
	avg	rms	avg	rms	avg	rms	avg	rms
10	36	36	16,59	58,67	3,02	3,02	151,11	151,12
15	36	36	38,35	108,98	4,78	4,78	238,97	238,99
20	36	36	69,69	168,70	6,56	6,56	328,23	328,24
25	36	36	110,23	235,78	8,36	8,36	417,78	417,80
30	36	36	160,46	308,95	10,15	10,15	507,45	507,46
35	36	36	219,53	397,47	11,94	11,94	597,13	597,14
40	36	36	288,07	470,77	13,74	13,74	686,79	686,80
45	36	36	365,24	558,52	15,53	15,53	776,42	776,43
50	36	36	451,94	650,36	17,32	17,32	866,02	866,04
55	36	36	541,76	740,14	19,00	19,00	950,14	950,15
60	36	36	639,21	833,62	20,69	20,69	1034,40	1034,40
65	36	36	744,86	930,54	22,37	22,37	1118,70	1118,70
70	36	36	859,01	1031,10	24,06	24,06	1203,20	1203,20
75	36	36	981,16	1135,60	25,75	25,75	1287,70	1287,70
80	36	36	1111,60	1243,90	27,45	27,45	1372,40	1372,40
85	36	36	1250,30	1355,80	29,14	29,14	1457,00	1457,00
90	36	36	1397,50	1472,80	30,84	30,84	1541,70	1541,70



Gambar 5.1 Bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran simulasi *buck converter* pada *duty cycle* 50%

5.1.4. Analisis Hasil Simulasi *Buck Converter*

Semakin besar *duty cycle*, maka tegangan keluaran akan semakin besar. Kenaikan tegangan tersebut memiliki kecenderungan linier. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2. Simulasi ini menunjukkan bahwa *ripple* tegangan perancangan *buck converter* ini sangat kecil, hal ini ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.2 Grafik tegangan keluaran fungsi *duty cycle* pada simulasi *buck converter*

5.2. Simulasi *Boost Converter*

5.2.1. Penentuan Komponen Simulasi

Skematik simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.7. Dari gambar tersebut dapat ditentukan jenis dan nilai komponen simulasi yang sesuai dengan perancangan. Penentuan jenis dan nilai komponen simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Penentuan komponen simulasi *boost converter*

No.	Komponen	Jenis	Nilai	Keterangan
1.	Vs	DC	5 V	
2.	PWM	Pulsa kotak	$V_{on} = 5V$ $T_{period} = 20 \mu s$ $T_{on} = 2 - 18 \mu s$	$f = 50 \text{ kHz}$
3.	MOSFET	IRFZ48Z		Paling mendekati IRFZ48V
4.	D	MUR460		Paling mendekati STTH60L06
5.	L		220 μH	
6.	C		100 μF	

5.2.2. Prosedur Simulasi

Prosedur simulasi *boost converter* adalah sebagai berikut:

1. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
2. Ukur tegangan masukan (V_s), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran *average* dan *rms*.
3. Catat hasil pengukuran.
4. Ulangi langkah 2 sampai 4 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
5. Simpan tampilan tegangan dan arus keluaran *buck converter* pada *duty cycle* 50%.

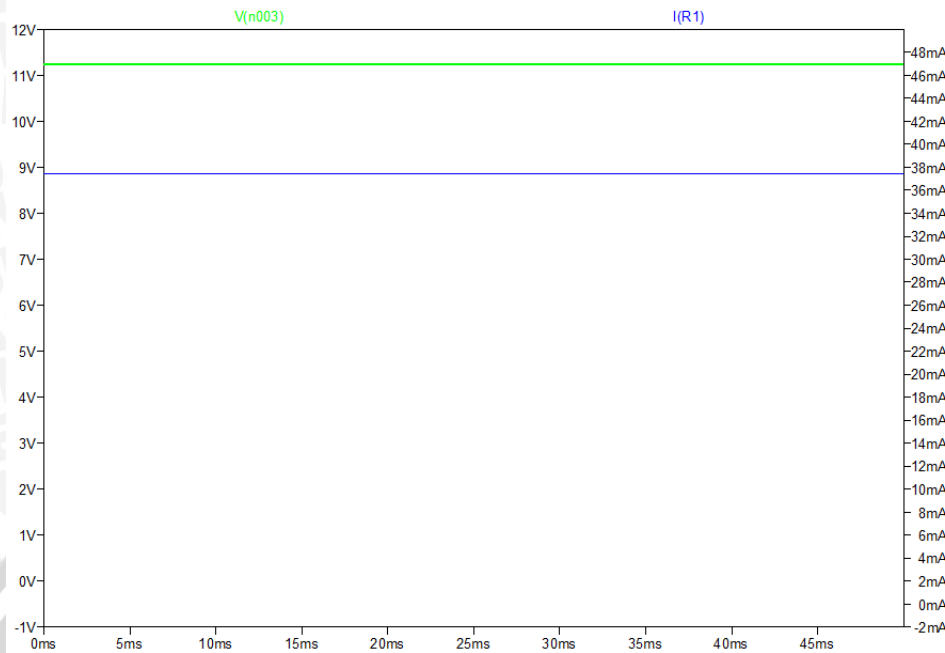
5.2.3. Hasil Simulasi *Boost Converter*

Hasil simulasi *boost converter* adalah sebagai berikut:

Tabel 5.4 Hasil simulasi *boost converter*

D (%)	V_s (V)		I_s (mA)		V_o (V)		I_o (mA)	
	avg	rms	avg	rms	avg	rms	avg	rms
10	5	5	20,31	26,28	5,18	5,18	17,27	17,27
15	5	5	25,40	35,03	5,80	5,80	19,33	19,33
20	5	5	32,12	45,04	6,54	6,54	21,80	21,80
25	5	5	40,42	56,41	7,36	7,36	24,53	24,53
30	5	5	50,50	69,33	8,27	8,27	27,52	27,52
35	5	5	56,79	77,10	8,77	8,77	29,24	29,24
40	5	5	70,52	92,73	9,78	9,78	32,60	32,60
45	5	5	86,14	110,08	10,83	10,83	36,11	36,11
50	5	5	92,67	116,98	11,24	11,24	37,47	37,47
55	5	5	117,91	142,42	12,68	12,68	42,25	42,25
60	5	5	124,47	149,16	13,04	13,04	43,47	43,47
65	5	5	139,38	163,08	13,79	13,79	45,95	45,95
70	5	5	188,13	208,45	15,97	15,97	53,25	53,25
75	5	5	267,62	283,71	18,93	18,93	63,12	63,12
80	5	5	407,61	419,00	23,05	23,05	76,83	76,83
85	5	5	683,60	690,35	28,92	28,92	96,40	96,40
90	5	5	1313,20	1316,00	36,80	36,80	122,67	122,67

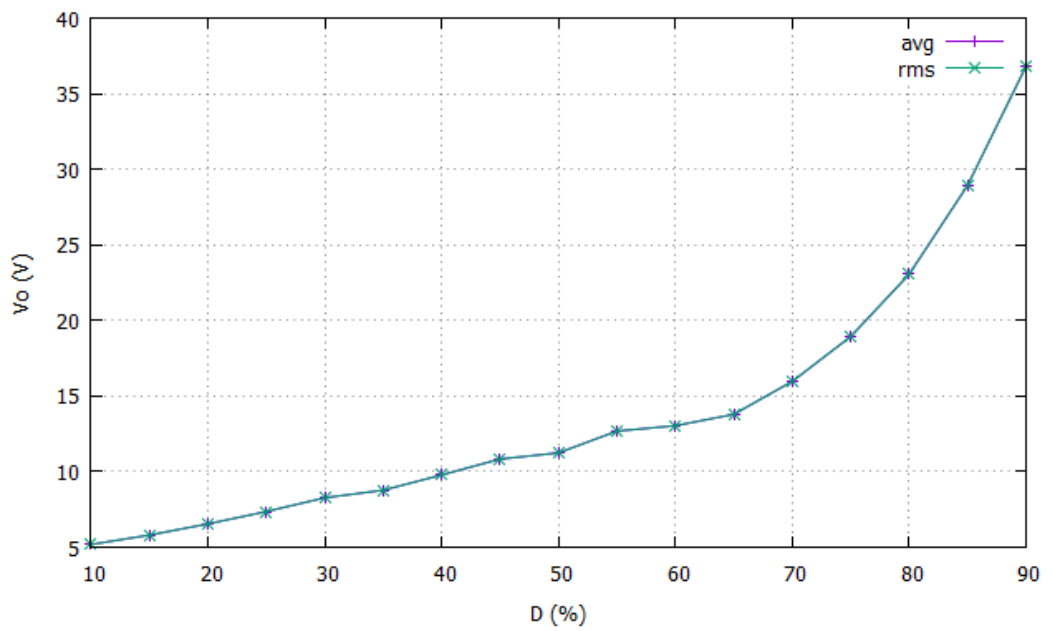




Gambar 5.3 Bentuk gelombang tegangan dan arus keluaran simulasi *boost converter* pada *duty cycle* 50%

5.2.4. Analisis Hasil Simulasi *Boost Converter*

Semakin besar *duty cycle*, maka tegangan keluaran akan semakin besar. Kenaikan tegangan tersebut memiliki kecenderungan eksponensial. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.4. Simulasi ini menunjukkan bahwa *ripple* tegangan perancangan *buck converter* ini sangat kecil, hal ini ditunjukkan pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Grafik tegangan keluaran rms dan avg pada simulasi *boost converter*



BAB VI

PENGUJIAN DAN ANALISIS

6.1. Pengujian Rangkaian Picu

6.1.1. Alat Pengujian

Alat pengujian yang dibutuhkan untuk pengujian ini adalah osiloskop beserta *probe*-nya. Osiloskop digunakan untuk menampilkan gelombang tegangan pulsa keluaran rangkaian picu.

6.1.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Atur mode menjadi mode *motoring*.
2. Atur *measurement* osiloskop untuk mengukur *duty cycle*, *rise time*, *fall time*, dan *frequency*.
3. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
4. Catat *duty cycle* (D), *rise time* (t_r), *fall time* (t_f), dan *frequency* (f).
5. Ulangi langkah 3 sampai 5 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
6. Simpan tampilan osiloskop pada saat *duty cycle* 50%.

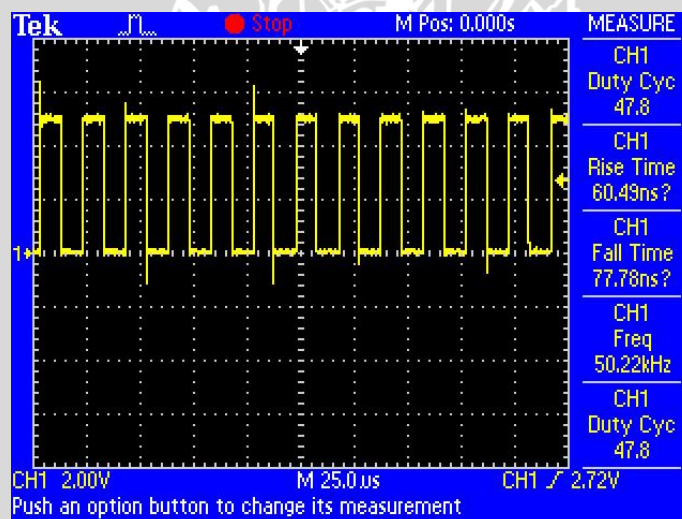
6.1.3. Hasil Pengujian Rangkaian Picu

Hasil pengujian rangkaian picu dapat dilihat pada Tabel 6.1. Pada *duty cycle* 50% keluaran pulsa rangkaian picu ditampilkan pada Gambar 6.1.

Tabel 6.1 Hasil pengujian rangkaian picu

D (%)		t_r (ns)	t_f (ns)	f (kHz)
LCD	Osiloskop			
10	11,1	84,75	129,10	50,02
15	13,1	56,31	30,30	50,30
20	17,7	60,24	81,97	50,48
25	24,8	71,82	46,15	50,29
30	28,1	132,40	126,20	50,30
35	32,8	33,90	30,77	50,00

LCD	D (%)		t_r (ns)	t_r (ns)	f (kHz)
	LCD	Osiloskop			
40		39,3	85,96	74,24	49,75
45		43,2	69,70	70,26	50,64
50		47,8	60,49	77,78	50,22
55		52,1	40,64	28,99	50,30
60		57,6	71,01	143,10	50,66
65		61,5	32,26	72,75	50,39
70		67,5	85,96	136,70	50,27
75		71,4	30,30	31,25	50,30
80		77,6	72,06	85,96	51,04
85		81,9	36,36	49,35	50,30
90		86,9	73,13	77,78	50,54



Gambar 6.1 Keluaran tegangan pulsa rangkaian picu pada *duty cycle* 50%

6.1.4. Analisis Hasil Pengujian Rangkaian Picu

Menurut Tabel 6.1, dapat dinyatakan bahwa rangkaian picu ini tidak dapat membangkit gelombang pulsa yang ber-*duty cycle* rendah. Dalam hal ini, batas *duty cycle*-nya adalah sekitar 10%. Bila *duty cycle* rangkain picu di atur berada di bawah 10%, maka *duty cycle* yang dibangkit 10% untuk *duty cycle* berapa pun di bawah 10%.

Dari Tabel 6.1 dapat dihitung beberapa parameter rangkaian picu, yaitu *error duty cycle*, *rise time*, *fall time*, dan frekuensi. Hasil penghitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.2. *Error* rata-rata rangkaian picu ini 5,4%. *Rise time* (t_r) dan *fall time* (t_f) rangkaian picu ini adalah 64,17 ns dan 73,84 ns. Frekuensi rata-rata rangkaian picu ini adalah 50,33 kHz, sehingga *error* frekuensi rangkaian picu ini adalah 0,66%. Pembuatan rangkaian picu ini dianggap berhasil karena semua *error* rata-rata berada di bawah 10%.

Tabel 6.2 Analisis hasil pengujian rangkaian picu

D (%)	<i>error</i> (%)	t_r (ns)	t_f (ns)	f (kHz)
10	11,00	84,75	129,10	50,02
15	12,67	56,31	30,30	50,30
20	11,50	60,24	81,97	50,48
25	0,80	71,82	46,15	50,29
30	6,33	132,40	126,20	50,30
35	6,29	33,90	30,77	50,00
40	1,75	85,96	74,24	49,75
45	4,00	69,70	70,26	50,64
50	4,40	60,49	77,78	50,22
55	5,27	40,64	28,99	50,30
60	4,00	71,01	143,10	50,66
65	5,38	32,26	72,75	50,39
70	3,57	85,96	136,70	50,27
75	4,80	30,30	31,25	50,30
80	3,00	72,06	85,96	51,04
85	3,65	36,36	49,35	50,30
90	3,44	73,13	77,78	50,54
rata-rata	5,40	64,55	76,04	50,34

6.2. Pengujian *Buck Converter*

6.2.1. Alat Pengujian

Alat yang digunakan pada pengujian *buck converter* ini adalah dua buah rmsmeter dan osiloskop beserta *probe*-nya, *buffer amplifier* beserta *resistor shunt*, dan satu buah resistor daya 20 Ω . Rmsmeter ditempatkan pada masukan dan keluaran *buck converter*. Rmsmeter dirangkai sebagai pengukur arus dan tegangan. Osiloskop digunakan untuk melihat gelombang tegangan dan arus keluaran. Beban pada pengujian *buck converter* ini adalah resistor daya 20 Ω .

6.2.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Atur alat menjadi mode *motoring*.
2. Atur sumber tegangan dc menjadi 36 V.
3. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
4. Ukur tegangan masukan (V_s), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran avg dan rms menggunakan rmsmeter.
5. Catat hasil pengukuran.
6. Ulangi langkah 3 sampai 5 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
7. Simpan tampilan osiloskop pada saat *duty cycle* 50%.

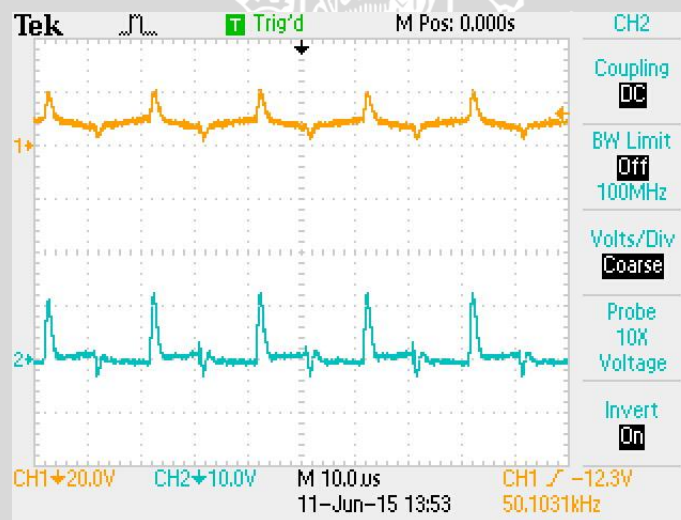
6.2.3. Hasil Pengujian

Hasil pengujian rangkaian picu dapat dilihat pada Tabel 6.3. Keluaran *buck converter* pada *duty cycle* 50% ditampilkan pada Gambar 6.2.

Tabel 6.3 Hasil pengujian *buck converter*

D (%)	V_s (V)		I_s (mA)		V_o (V)		I_o (mA)		P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
	avg	rms	avg	Rms	avg	rms	avg	rms			
10	36	36	16	25	4	4	155	155	0,58	0,54	94,18
15	36	36	24	48	4	4	185	185	0,86	0,78	89,93
20	36	36	49	89	6	6	265	265	1,76	1,59	90,14
25	36	36	81	130	8	8	350	350	2,92	2,66	91,22
30	36	36	120	175	9	10	430	430	4,32	4,04	93,56

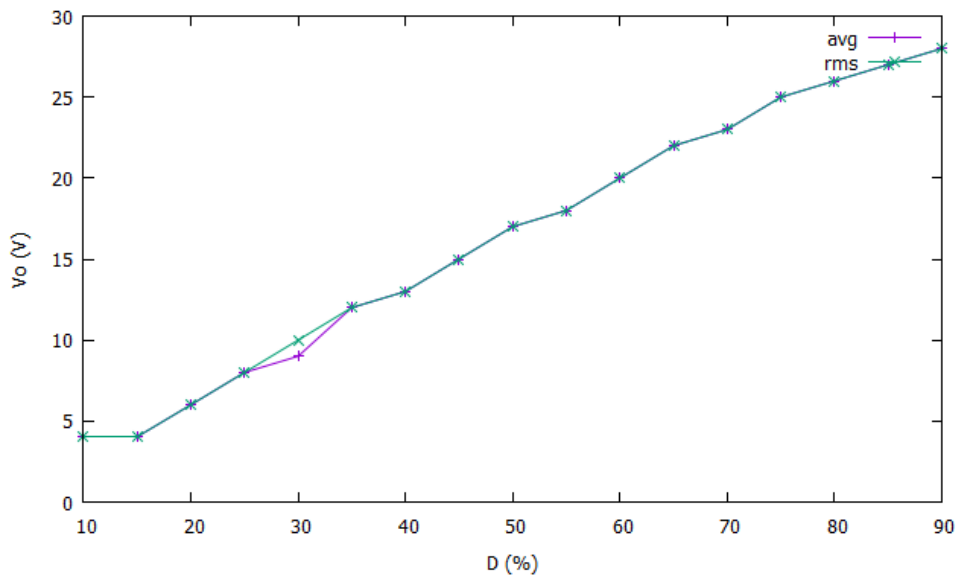
D (%)	V _s (V)		I _s (mA)		V _o (V)		I _o (mA)		P _{in} (W)	P _{out} (W)	η (%)
	avg	rms	avg	Rms	avg	rms	avg	rms			
35	36	36	160	240	12	12	500	500	5,76	5,75	99,83
40	36	36	210	300	13	13	580	580	7,56	7,54	99,74
45	36	36	270	370	15	15	660	660	9,72	9,57	98,46
50	36	36	340	450	17	17	740	740	12,24	12,21	99,75
55	36	36	415	510	18	18	820	820	14,94	14,76	98,80
60	36	36	495	600	20	20	890	890	17,82	17,80	99,89
65	36	36	580	620	22	22	970	970	20,88	20,86	99,88
70	36	36	675	750	23	23	1050	1050	24,30	24,15	99,38
75	36	36	770	870	25	25	1100	1100	27,72	26,95	97,22
80	36	36	880	950	26	26	1150	1150	31,68	29,90	94,38
85	36	36	980	1050	27	27	1250	1250	35,28	33,75	95,66
90	36	36	1050	1100	28	28	1300	1300	37,80	36,40	96,30



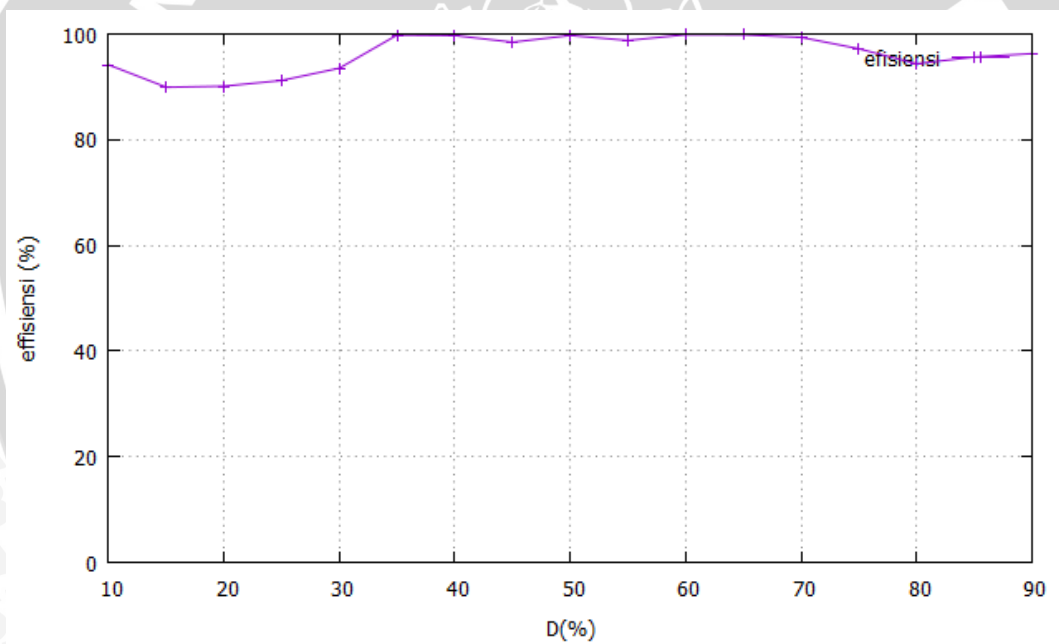
Gambar 6.2 Keluaran tegangan dan arus *buck converter* pada *duty cycle*.

6.2.4. Analisis Hasil Pengujian *Buck Converter*

Terjadi kenaikan tegangan keluaran pada *buck converter* dengan meningkatnya *duty cycle* meningkat yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. Efisiensi *buck converter* memiliki kecenderungan fluktuatif dengan efisiensi tertinggi pada *duty cycle* 60% sebesar 99,89% dan efisiensi terendah pada *duty cycle* 15% sebesar 89,93%. Grafik efisiensi ditunjukkan pada Gambar 6.4. Kefluktuatifan efisiensi ini dikarenakan akurasi alat ukur yang kurang bagus.



Gambar 6.3 Grafik tegangan keluaran avg dan rms pada pengujian *buck converter*



Gambar 6.4 Grafik perubahan efisiensi terhadap perubahan *duty cycle* pada *buck converter*

Error tegangan keluaran *buck converter* ini adalah 6,89% dengan data simulasi sebagai data acuan. Data *error* ini ditunjukkan pada Tabel 6.4. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa faktor minor pada rangkaian daya yang belum dideklarasikan secara detail pada simulasi seperti resistansi parasitik pada kapasitor. Kemampuan rangkaian picu juga mempengaruhi *error* ini. Namun, karena *error* tegangan keluaran ini di bawah 10%, maka *buck converter* ini dianggap berhasil.

Tabel 6.4 Perbandingan antaran simulasi dan pengujian *buck converter*

D (%)	$V_{o,simulasi}$ (V)	$V_{o,pengujian}$ (V)	ϵ (%)
10	3,02	3,50	15,89
15	4,78	4,20	12,13
20	6,56	6,00	8,54
25	8,36	7,60	9,09
30	10,15	9,40	7,39
35	11,94	11,50	3,69
40	13,74	13,00	5,39
45	15,53	14,50	6,63
50	17,32	16,50	4,73
55	19,00	18,00	5,26
60	20,69	20,00	3,33
65	22,37	21,50	3,89
70	24,06	23,00	4,41
75	25,75	24,50	4,85
80	27,45	26,00	5,28
85	29,14	27,00	7,34
90	30,84	28,00	9,21
		rata-rata	6,89

6.3. Pengujian *Boost Converter* Tanpa Umpan Balik

6.3.1. Alat Pengujian

Alat yang digunakan pada pengujian *buck converter* ini adalah dua buah rmsmeter dan osiloskop beserta *probe*-nya, *buffer amplifier* beserta *resistor shunt*, dan satu buah resistor daya 300 Ω . Rmsmeter ditempatkan pada masukan dan keluaran *buck converter*. Rmsmeter dirangkai sebagai pengukur arus dan tegangan. Osiloskop digunakan untuk melihat gelombang tegangan dan arus keluaran. Beban pada pengujian *buck converter* ini adalah resistor daya 300 Ω .

6.3.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Atur alat menjadi mode *motoring*.
2. Atur sumber tegangan dc menjadi 36 V.
3. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
4. Ukur tegangan masukan (V_s), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran avg dan rms menggunakan rmsmeter.
5. Catat hasil pengukuran.
6. Ulangi langkah 3 sampai 5 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
7. Simpan tampilan osiloskop pada saat *duty cycle* 50%.

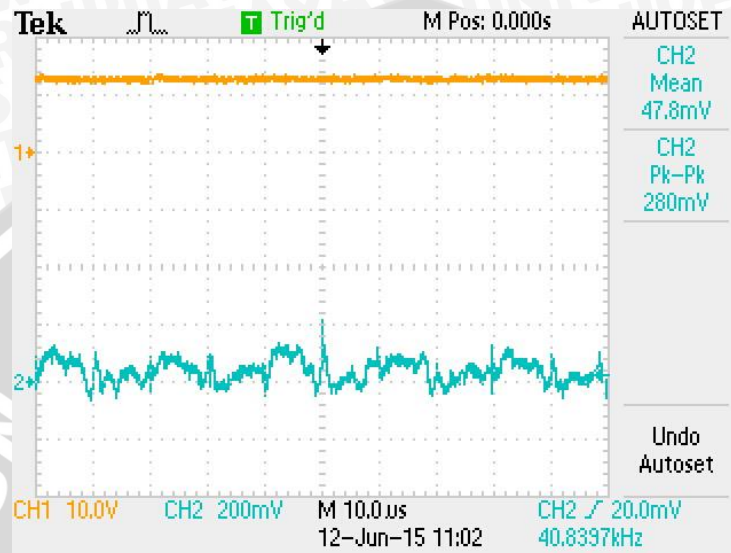
6.3.3. Hasil Pengujian *Boost Converter* Tanpa Umpan Balik

Hasil pengujian rangkaian picu dapat dilihat pada Tabel 6.5. Pada *duty cycle* 50% keluaran pulsa *buck converter* ditampilkan pada Gambar 6.5.

Tabel 6.5 Hasil pengujian *boost converter* tanpa umpan balik

D (%)	V_s (V)		I_s (mA)		V_o (V)		I_o (mA)		P_i (mW)	P_o (mW)	η (%)
	avg	rms	avg	rms	avg	rms	avg	rms			
10	5	5	17	20	6,0	6,0	11	11	85,0	66,0	77,65
15	5	5	19	24	6,1	6,1	12	12	95,0	73,2	77,05
20	5	5	24	26	6,8	6,8	14	14	120,0	95,2	79,33
25	5	5	30	40	7,5	7,5	16	16	150,0	120,0	80,00
30	5	5	38	49	8,3	8,3	18	18	190,0	149,4	78,63
35	5	5	47	59	9,1	9,1	21	21	235,0	191,1	81,32
40	5	5	60	73	10,5	10,5	24	24	300,0	252,0	84,00
45	5	5	71	86	11,0	11,0	27	27	355,0	297,0	83,66
50	5	5	79	94	12,0	12,0	28	28	395,0	336,0	85,06
55	5	5	98	110	13,0	13,0	32	32	490,0	416,0	84,90
60	5	5	110	125	14,0	14,0	35	35	550,0	490,0	89,09
65	5	5	120	135	14,5	14,5	36	36	600,0	522,0	87,00
70	5	5	150	170	16,0	16,0	41	41	750,0	656,0	87,47
75	5	5	210	225	18,5	18,5	49	49	1050,0	906,5	86,33
80	5	5	300	310	22,0	22,0	59	59	1500,0	1298,0	86,53

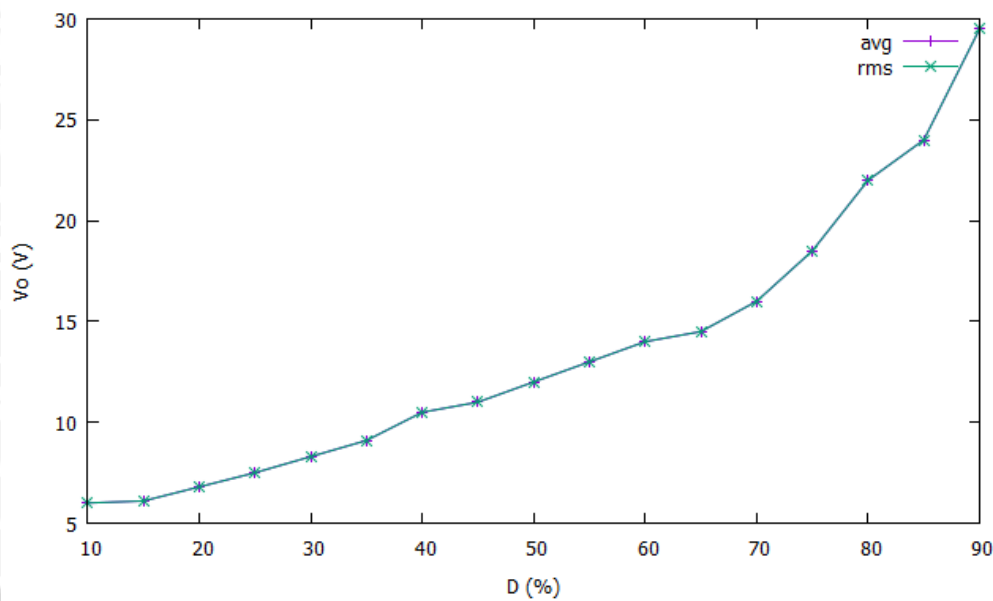
D (%)	V _s (V)		I _s (mA)		V _o (V)		I _o (mA)		P _i (mW)	P _o (mW)	η (%)
	avg	rms	avg	rms	avg	rms	avg	rms			
85	5	5	470	490	24,0	24,0	72	72	2350,0	1728,0	73,53
90	5	5	700	720	29,5	29,5	83	83	3500,0	2448,5	69,96



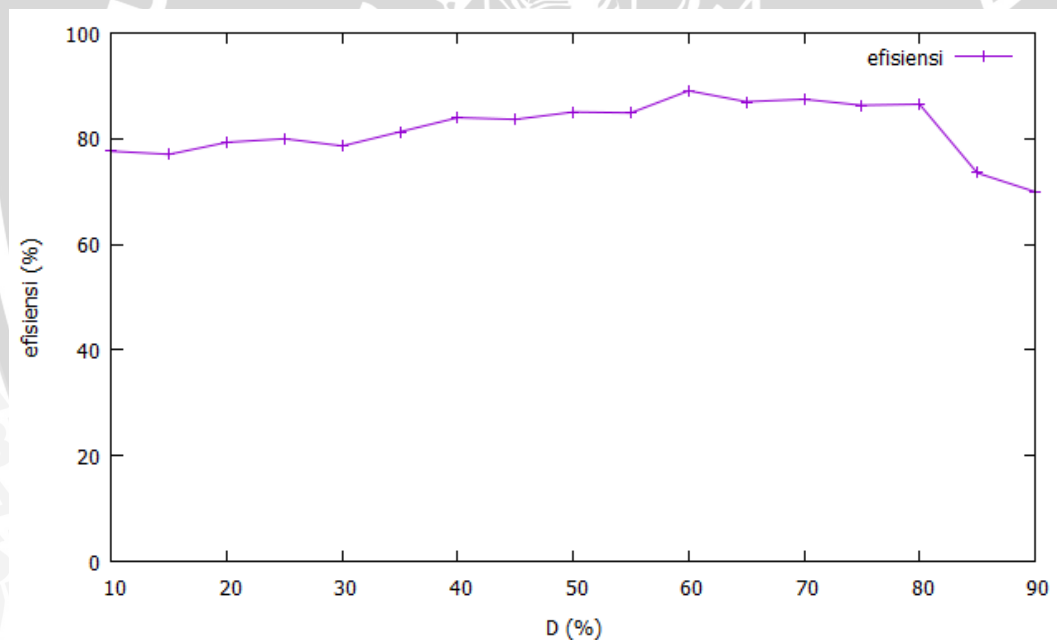
Gambar 6.5 Keluaran tegangan dan arus *boost converter* pada saat *duty cycle* 50%

6.3.4. Analisis Pengujian *Boost Converter* Tanpa Umpan Balik

Terjadi kenaikan tegangan keluaran pada *buck converter* dengan meningkatnya *duty cycle* meningkat yang ditunjukkan pada Gambar 6.6. Efisiensi *boost converter* turun dengan meningkatnya *duty cycle* dengan efisiensi tertinggi sebesar 89,09% dan efisiensi terendah sebesar 69,96%. Grafik efisiensi ditunjukkan pada Gambar 6.7.



Gambar 6.6 Grafik tegangan keluaran rms dan avg pada pengujian *boost converter* tanpa umpan balik



Gambar 6.7 Grafik perubahan efisiensi terhadap perubahan *duty cycle* pada *boost converter*

Error tegangan keluaran *boost converter* ini adalah 6,21% dengan data simulasi sebagai data acuan. Data *error* ini ditunjukkan pada Tabel 6.6. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa faktor minor pada rangkaian daya yang belum dideklarasikan secara detail pada simulasi seperti resistansi parasitik pada kapasitor. Kemampuan rangkaian picu juga mempengaruhi *error* ini. Namun,

karena *error* tegangan keluaran ini di bawah 10%, maka *buck converter* ini dianggap berhasil.

Tabel 6.6 Perbandingan simulasi dan pengujian *boost converter* tanpa umpan balik

D (%)	$V_{o,simulasi}$ (V)	$V_{o,pengujian}$ (V)	ϵ (%)
10	5,18	6,0	15,83
15	5,80	6,1	5,17
20	6,54	6,8	3,98
25	7,36	7,5	1,90
30	8,27	8,3	0,36
35	8,77	9,1	3,76
40	9,78	10,5	7,36
45	10,83	11,0	1,57
50	11,24	12,0	6,76
55	12,68	13,0	2,52
60	13,04	14,0	7,36
65	13,79	14,5	5,15
70	15,97	16,0	0,19
75	18,93	18,5	2,27
80	23,05	22,0	4,56
85	28,92	24,0	17,01
90	36,80	29,5	19,84
		rata-rata	6,21

6.4. Pengujian *Boost Converter* Dengan Umpan Balik

6.4.1. Alat Pengujian

Alat yang digunakan pada pengujian *buck converter* ini adalah dua buah rmsmeter dan osiloskop beserta *probe*-nya, *buffer amplifier* beserta *resistor shunt*, dan satu buah resistor daya 300 Ω . Rmsmeter ditempatkan pada masukan dan keluaran *buck converter*. Rmsmeter dirangkai sebagai pengukur arus dan tegangan. Osiloskop digunakan untuk melihat gelombang tegangan dan arus keluaran. Beban pada pengujian *buck converter* ini adalah resistor daya 300 Ω .

6.4.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Atur alat menjadi mode *braking*.
2. Atur sumber tegangan dc menjadi 2 V.
3. Ukur *duty cycle* (D), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran avg dan rms menggunakan rmsmeter.
4. Catat hasil pengukuran.
5. Ulangi langkah 2 sampai 5 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.

6.4.3. Hasil Pengujian *Boost Converter* Dengan Umpan Balik

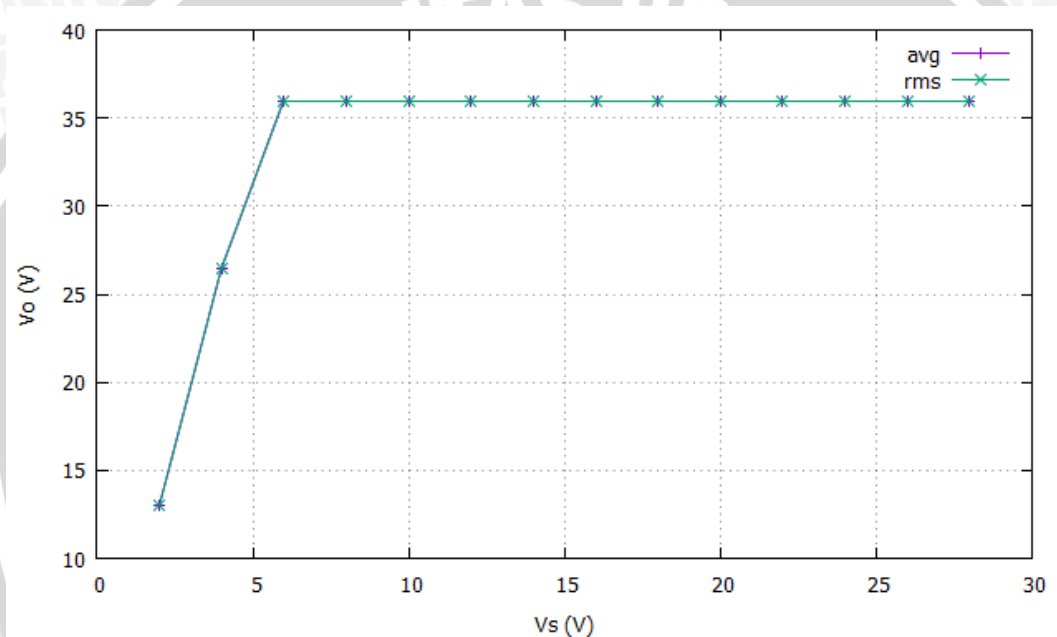
Hasil pengujian rangkaian picu dapat dilihat pada Tabel 6.7.

Tabel 6.7 Hasil pengujian *boost converter* dengan umpan balik

V_s (V)	D (%)	I_s (mA)		V_o (V)		I_o (mA)	
		avg	rms	avg	rms	avg	rms
2	90	290,00	300,00	13,00	13,00	31,00	31,00
4	90	600,00	620,00	26,50	26,50	71,00	71,00
6	90	860,00	870,00	36,00	36,00	105,00	105,00
8	88	740,00	800,00	36,00	36,00	105,00	105,00
10	73	410,00	450,00	36,00	36,00	105,00	105,00
12	68	330,00	380,00	36,00	36,00	105,00	105,00
14	57	280,00	320,00	36,00	36,00	105,00	105,00
16	52	250,00	300,00	36,00	36,00	105,00	105,00
18	46	230,00	280,00	36,00	36,00	105,00	105,00
20	36	200,00	250,00	36,00	36,00	105,00	105,00
22	30	180,00	210,00	36,00	36,00	105,00	105,00
24	25	160,00	200,00	36,00	36,00	105,00	105,00
26	21	150,00	190,00	36,00	36,00	105,00	105,00
28	18	140,00	170,00	36,00	36,00	105,00	105,00

6.4.4. Analisis Hasil Pengujian *Boost Converter* Dengan Umpan Balik

Dari Tabel 6.7 dapat dinyatakan bahwa tegangan masukan kritis *boost converter* dengan umpan balik adalah sekitar 6 V – 8 V untuk beban resistif. Tegangan kritis adalah tegangan masukan *boost converter* dimana tegangan keluarannya masih bernilai sama dengan *set point* (pada penelitian ini 36 V), bila tegangan masukan tersebut diturunkan maka tegangan keluaran akan berada di bawah tegangan *set point*-nya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.8.



Gambar 6.8 Grafik tegangan keluaran pada pengujian *boost converter* menggunakan umpan balik

6.5. Pengujian Sistem *Motoring*

6.5.1. Alat Pengujian

Alat pengujian dari sistem *motoring* adalah dua buah rmsmeter dan tachometer. Rmsmeter ditempatkan pada masukan dan keluaran *buck converter*. Rmsmeter dirangkai sebagai pengukur arus dan tegangan. Tachometer digunakan untuk menghitung putaran motor arus searah magnet permanen ini.

6.5.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Atur alat menjadi mode *motoring*.
2. Atur sumber tegangan dc menjadi 36 V.
3. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
4. Ukur tegangan masukan (V_s), arus masukan (I_s), tegangan keluaran (V_o), dan arus keluaran (I_o) dalam besaran avg dan rms menggunakan rmsmeter, serta ukur putaran motor (n) menggunakan tachometer.
5. Catat hasil pengukuran.
6. Ulangi langkah 4 sampai 5 dengan kenaikan 10% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.

6.5.3. Hasil Pengujian

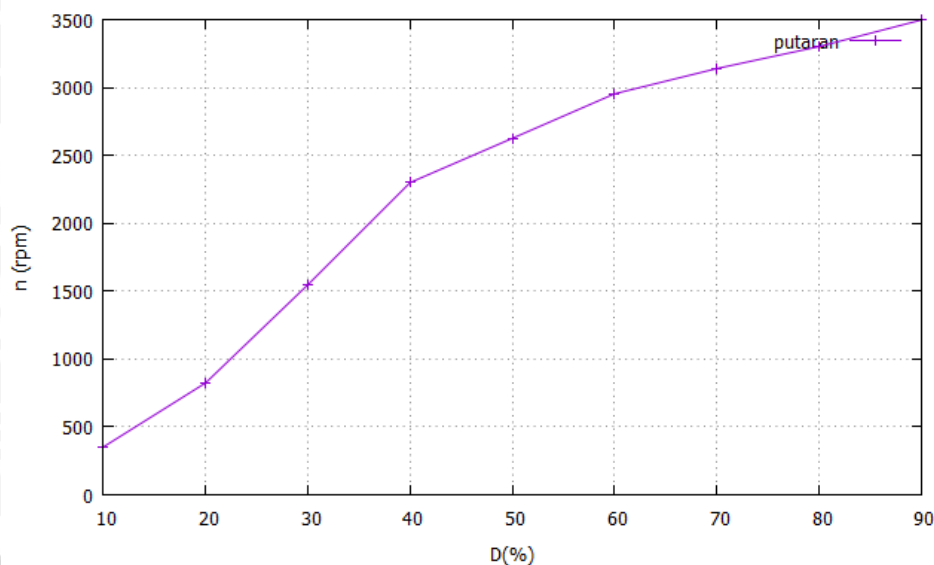
Hasil pengujian sistem *motoring* ditunjukkan pada Tabel 6.8.

Tabel 6.8 Hasil pengujian sistem *motoring*

D (%)	V_s (V)		I_s (mA)		V_o (V)		I_o (mA)		n (rpm)
	avg	rms	avg	rms	avg	rms	avg	rms	
10	36	36	15	31	4	4	125	125	352
20	36	36	38	70	9	9	140	140	824
30	36	36	70	110	16	16	155	155	1548
40	36	36	100	140	22	22	160	160	2300
50	36	36	120	155	25	25	165	165	2626
60	36	36	135	170	28	28	170	170	2954
70	36	36	145	170	30	30	170	170	3140
80	36	36	155	180	30	30	175	175	3302
90	36	36	165	180	32	32	180	180	3498

6.5.4. Analisis Hasil Pengujian Sistem *Motoring*

Pada pengujian mode *motoring* semakin besar *duty cycle*, maka putaran motor akan semakin besar pula dengan kecenderungan linear. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 6.9.



Gambar 6.9 Grafik putaran fungsi *duty cycle* pada pengujian sistem *motoring*

6.6. Pengujian Sistem *Braking*

6.6.1. Alat Pengujian

Alat ukur yang dibutuhkan pada pengujian ini adalah sebuah *stopwatch* dan *rmsmeter*. *Stopwatch* digunakan untuk mengukur waktu berhenti dari motor saat mode *braking*, sedangkan *rmsmeter* digunakan untuk mengukur tegangan keluaran *boost converter* dan arus yang menuju baterai.

6.6.2. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Atur mode alat menjadi mode *motoring*.
2. Putar motor sampai dengan 900 rpm (n_b).
3. Ganti mode motor menjadi mode *braking*.
4. Ukur besar waktu yang perubahan putaran dari putaran awal sampai putaran bernilai nol (t_b).
5. Catat nilai tegangan keluaran *boost converter* (V_{boost}) dan arus yang menuju baterai (I_{bat}).
6. Ulangi langkah 1 sampai 4 dengan peningkatan putaran motor sebesar 300 rpm sampai dengan putaran 300 rpm.

6.6.3. Hasil Pengujian

Hasil pengujian sistem *braking* ditunjukkan pada Tabel 6.9.

Tabel 6.9 Hasil pengujian sistem *braking*

n_b (rpm)	Dengan pengereman				Tanpa pengereman			
	t_b (s)			$t_{b,mean}$	t_b (s)			$t_{b,mean}$
900	0,50	0,61	0,51	0,54	0,62	0,62	0,65	0,63
1200	0,73	0,73	0,67	0,71	0,81	0,90	0,75	0,82
1500	0,92	0,81	0,91	0,88	1,01	0,95	0,92	0,96
1800	1,03	1,06	1,06	1,05	1,25	1,22	1,16	1,21
2100	1,23	1,22	1,24	1,23	1,44	1,44	1,50	1,46
2400	1,35	1,36	1,28	1,33	1,54	1,51	1,51	1,52
2700	1,55	1,44	1,36	1,45	1,70	1,66	1,68	1,68
3000	1,58	1,60	1,56	1,58	2,03	1,81	1,83	1,89
3300	1,81	1,81	1,81	1,81	2,24	2,34	2,05	2,21

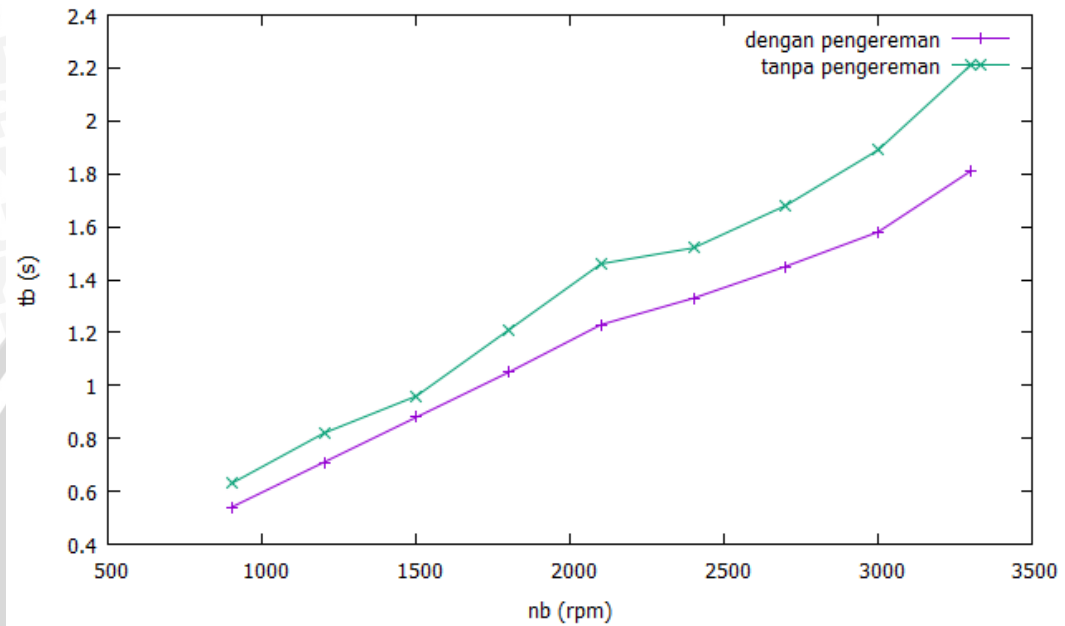
Tabel 6.10 Daya regeneratif terhadap putaran motor

n_b (rpm)	t_b (s)	V_{boost} (V)	I_{bat} (mA)	P_{reg} (mW)	E_{reg}	
					mJ	mWh
900,00	0,54	36	2	72	38,88	0,011
1200,00	0,71	36	3	108	76,68	0,021
1500,00	0,88	36	6	216	190,08	0,053
1800,00	1,05	36	17	612	642,60	0,179
2100,00	1,23	36	34	1224	1505,52	0,418
2400,00	1,33	36	49	1764	2346,12	0,652
2700,00	1,45	36	64	2304	3340,80	0,928
3000,00	1,58	36	80	2880	4550,40	1,264
3300,00	1,81	36	95	3420	6190,20	1,720

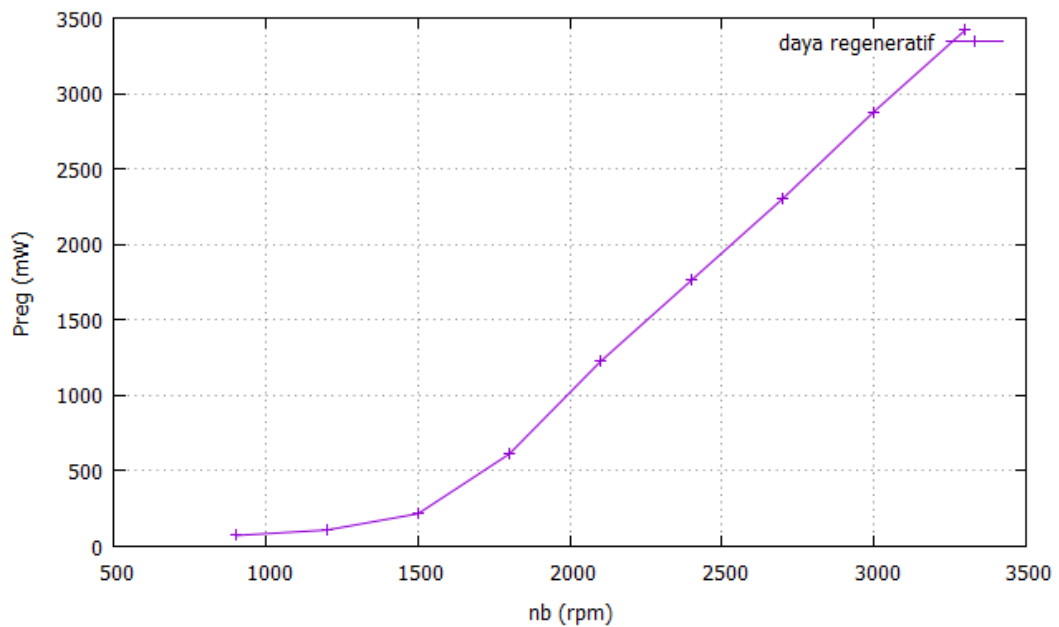
6.6.4. Analisis Hasil Pengujian

Waktu pengereman rata-rata ditunjukkan pada Tabel 6.9. Daya regeneratif alat ini meningkat dengan meningkatnya putaran awal sebelum pengereman (n_b). Karena arus dan daya yang menuju baterai pada saat pengereman tidak konstan,

maka penggunaan prinsip *constant voltage* tidak berhasil. Namun, secara sistem pengereman regeneratif ini dinyatakan berhasil karena waktu pengereman menggunakan pengereman regeneratif lebih kecil dari pada tanpa menggunakan pengereman regeneratif, hal ditunjukkan dalam Gambar 6.10.



Gambar 6.10 Grafik waktu pengereman regeneratif



Gambar 6.11 Grafik daya pengereman regeneratif

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini terdapat dua kuadran pengendalian, yaitu pada pengendalian kuadran I dan pengendalian kuadran II. Pengendalian kuadran I adalah *motoring*. Pada kuadran I ini konverter daya yang digunakan adalah *buck converter*. Sistem pengendali untuk kuadran ini adalah *loop* terbuka. Pengendalian kuadran II adalah *braking*. Pada kuadran II ini konverter daya yang digunakan adalah *boost converter*. Sistem pengendali untuk kuadran ini adalah *loop* tertutup dengan sensor tegangan pada keluaran *boost converter* sebagai umpan balik.
2. Motor yang digunakan pada perancangan ini memiliki tegangan nominal sebesar 38 V dan arus nominal sebesar 1,9 A. Rangkaian picu pada perancangan ini menggunakan ATmega16. Frekuensi *switching* yang digunakan pada rangkaian picu ini adalah 50 kHz. *Duty cycle* rangkaian picu ini adalah 10% - 90%. Pada *buck converter* induktor daya yang digunakan sebesar 220 μH dan kapasitor yang digunakan adalah sebesar 4,7 μF . Pada *boost converter* induktor daya yang digunakan sebesar 220 μH dan kapasitor yang digunakan adalah sebesar 100 μF .
3. Pada rangkaian picu, *error* frekuensinya adalah 0,66%. Pada *buck converter*, *error* tegangan keluarannya adalah 6,89% dengan data simulasi *buck converter* sebagai acuan. Pada *boost converter*, *error* tegangan keluarannya adalah 6,21% dengan data simulasi sebagai data acuan.
4. *Buck converter* memiliki efisiensi paling tinggi sebesar 99,89% dan efisiensi paling rendah sebesar 89,93%. Efisiensi *boost converter* turun dengan meningkatnya *duty cycle* dengan efisiensi tertinggi sebesar 89,09% dan efisiensi terendah sebesar 69,96%. Pada saat mode *motoring*, semakin besar *duty cycle*, maka putaran motor akan semakin besar pula. Pada saat mode *braking*, daya regeneratif alat ini meningkat dengan meningkatnya putaran awal sebelum pengereman. Dari hasil pengujian menunjukkan

bahwa arus dan daya yang menuju baterai pada saat pengereman tidak konstan, maka penggunaan prinsip *constant voltage* dan penggunaan sensor tegangan berupa pembagi tegangan tidak berhasil. Namun, secara sistem pengereman regeneratif ini dinyatakan berhasil karena waktu pengereman menggunakan pengereman regeneratif lebih kecil dari pada tanpa menggunakan pengereman regeneratif.

7.2. Saran

Terdapat beberapa hal yang masih dapat dikembangkan lebih lanjut agar sistem ini dapat menjadi sempurna adalah penggunaan prinsip *constant current* pada saat *braking*. Penggunaan prinsip ini dapat diaplikasikan menggunakan sensor arus.



DAFTAR PUSTAKA

- Adrianto, H. (2013). *Pemrograman Mikrokontroler AVR ATmega16 Menggunakan Bahasa C (CodeVision AVR), edisi revisi*. Bandung: Informatika.
- Dubey, G. K. (2001). *Fundamentals of Electrical Drives*. Pangbourne: Alpha Science International.
- Electronics Component Store*. (2015, April 14). Diambil kembali dari SFE Electronics Website: <http://www.sfe-electronics.com>
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Jr., C., & Umans, S. (2003). *Electric Machinery, 6th Ed*. New York: McGraw-Hill.
- Gates Energy Products, Inc. (1998). *Rechargeable Batteries Applications Handbook*. Newton: Newnes.
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Pavlov, D. (2011). *Lead-Acid Batteries Science and Technology*. Amsterdam: Elsevier.
- Pillai, S. K. (1989). *A First Course of Electrical Drives*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Rashid, M. H., & Rashid, H. M. (2006). *SPICE For Power Electronics and Electric Power*. New York: CRC Press.
- Sen, P. C. (1997). *Principles of Electric Machines and Power Electronics, Second Edition*. Canada: John Wiley and Sons, Inc.
- Torex Semiconductor Ltd. (2008). *DC/DC Converter Study Guide*. Tokyo: Torex Semiconductor Ltd.
- Winoto, A. (2010). *Mikrokontroler AVR ATmega8/16/32/8535 dan Pemrogramannya dengan Bahasa C pada WinAVR*. Bandung: Informatika.
- Yoong, M., Gan, Y., Gan, G., Leong, C., Z. Y., P., Cheah, B., & K. W. Chew. (2010). Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicles. *IEEE Conference of Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 40-45.

LAMPIRAN

