



RANCANG BANGUN *BUCK CONVERTER* DENGAN *ZERO VOLTAGE SWITCHING* SEBAGAI PENGATUR KECEPATAN MOTOR DC PENGUATAN TERPISAH BERBASIS ARDUINO

SKRIPSI

Oleh

**Muhammad Ana Fahrudin
NIM 121910201088**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**



RANCANG BANGUN *BUCK CONVERTER* DENGAN *ZERO VOLTAGE SWITCHING* SEBAGAI PENGATUR KECEPATAN MOTOR DC PENGUATAN TERPISAH BERBASIS ARDUINO

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

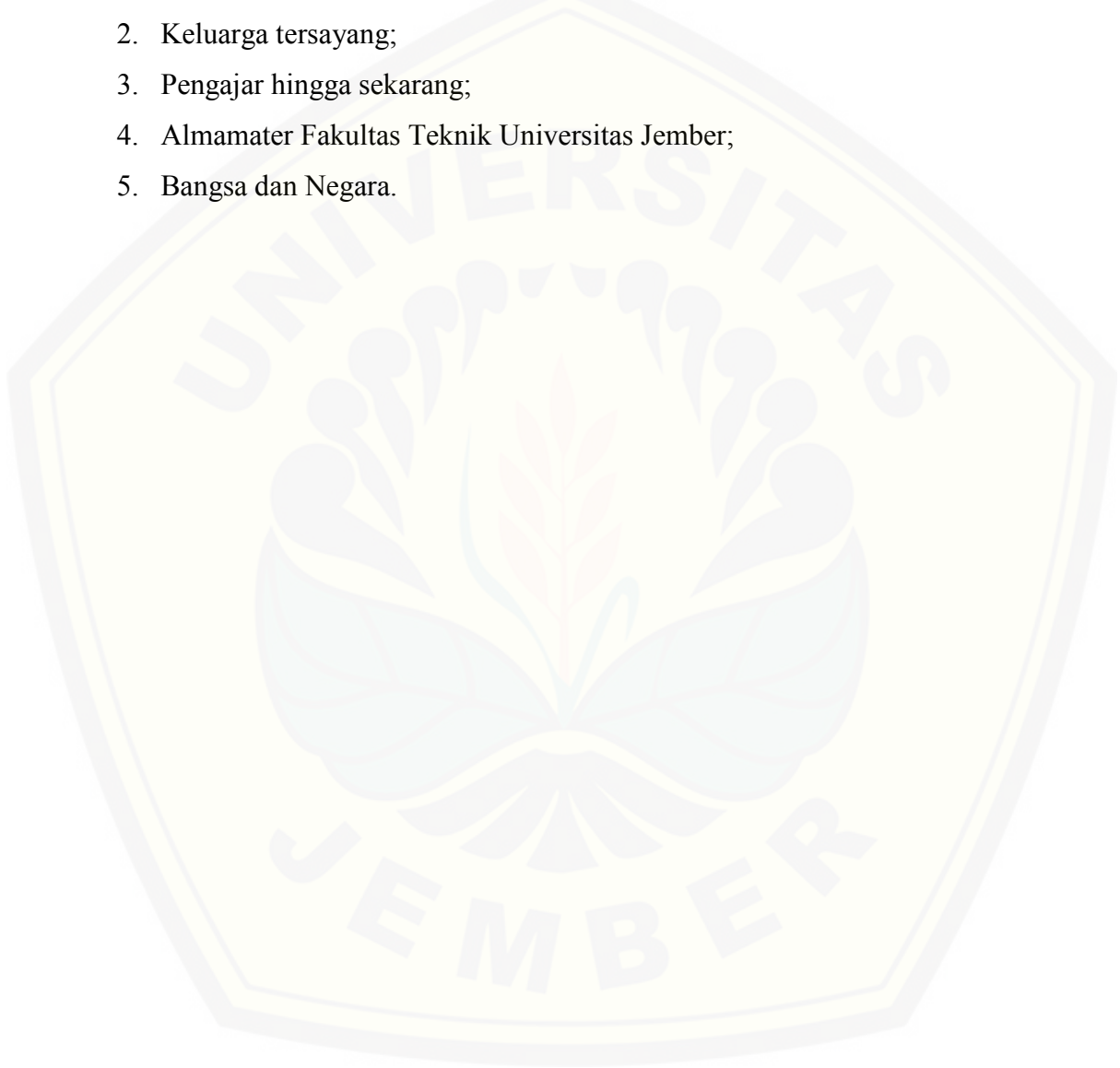
**Muhammad Ana Fahrudin
NIM 121910201088**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2019**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibu Siti Munawaroh dan Bapak Marjuki yang tercinta;
2. Keluarga tersayang;
3. Pengajar hingga sekarang;
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember;
5. Bangsa dan Negara.



MOTO

Janganlah kamu bersikap lemah, dan janganlah (pula) kamu bersedih hati,
padahal kamulah orang-orang yang paling tinggi (derajatnya),
jika kamu orang-orang yang beriman.
(terjemahan Surat *Ali 'Imran* ayat 139)

Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antara kamu dan
orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.
(terjemahan Surat *Al-Mujadalah* ayat 11)

Barang siapa menapaki suatu jalan dalam rangka mencari ilmu maka
Allah akan memudahkan baginya jalan ke surga.
(H.R. Ibnu Majah & Abu Dawud)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Ana Fahrudin

NIM : 121910201088

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 24 Januari 2019

Yang menyatakan,

Muhammad Ana Fahrudin
NIM 120910201088

SKRIPSI

RANCANG BANGUN *BUCK CONVERTER* DENGAN *ZERO VOLTAGE SWITCHING* SEBAGAI PENGATUR KECEPATAN MOTOR DC PENGUATAN TERPISAH BERBASIS ARDUINO

Oleh

Muhammad Ana Fahrudin
NIM 121910201088

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Widyono Hadi, M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino” karya Muhammad Ana Fahrudin telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 24 Januari 2019

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.
NIP 19631201 199402 1 002

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP 19610414 198902 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 19700404199601 1 001

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 19700826 199702 1 001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP 19661215 199503 2 001

Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino

Muhammad Ana Fahrudin

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Motor DC merupakan perangkat mesin listrik dinamis yang digunakan sebagai penggerak mesin produksi di industri. Dalam pengoperasiannya motor DC memiliki karakteristik harus dapat berputar secara stabil, tetapi jika mendapatkan pembebanan saat beroperasi maka kecepatan akan berkurang dari kondisi yang telah ditentukan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan suatu rancangan sistem suplai dan pengatur kecepatan motor DC penguat terpisah agar kecepatan motor dapat berputar secara stabil saat tanpa beban maupun berbeban. Maka dibuat suatu konverter DC-DC tipe *buck converter* dengan menggunakan mode pensaklaran *zero voltage switching (ZVS)* sebagai suplai tegangan kumparan medan pada motor DC penguat terpisah yang dikontrol menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dibangkitkan oleh mikrokontroler Arduino Uno. Hasil pengujian menunjukkan *buck converter* mampu melakukan pensaklaran saat tegangan nol (*ZVS*) dan mensuplai tegangan pada kumparan medan serta kecepatan motor DC penguat terpisah dapat dikontrol secara otomatis saat kondisi tanpa beban atau berbeban (15, 25, 40, 50, dan 60 watt) dengan *set point* kecepatan yang telah ditentukan yaitu sebesar 800 rpm. Rata-rata presentase *error* pada sistem kontrol motor secara otomatis sebesar 0,85% dan efisiensi tertinggi (saat *duty cycle* 100%) pada *buck converter* dengan mode pensaklaran *zero voltage switching* sebesar 92,83%.

Kata kunci: *Buck converter*, *Zero voltage switching (ZVS)*, Motor DC penguat terpisah, PWM, Arduino Uno

Design Buck Converter With Zero Voltage Switching As A Speed Control Of Separately Excited DC Motor Based Arduino

Muhammad Ana Fahrudin

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRACT

DC motor is an electric machine device that is used as a driver of production machinery in the industry. In operating a DC motor the characteristics must be able to be rotated stably, but if it gets charged when operated, the speed will decrease from the conditions that have been determined. To overcome this problem, a supply system and DC motor speed regulator are needed so that the motor speed can be adjusted stably when it is free of load and burden. Then a buck converter type DC-DC converter is made using zero voltage switching (ZVS) switching mode as a field coil supply in the separately excited dc motor which is controlled using PWM (Pulse Width Modulation) generated by the Arduino Uno microcontroller. The test results show that the buck converter is capable of switching at zero voltage (ZVS) and supplying voltage on the field coil and the separately excited dc motor can be controlled automatically when the condition is no load or load (15, 25, 40, 50 and 60 watts) with the set point has been specified speed of 800 rpm. The average percentage error in the automatic motor control system is of 0.85% and the highest efficiency (at 100% cycle) in the buck converter with zero voltage switching mode is of 92.83%.

Keywords: *Buck Converter, Zero Voltage Switching (ZVS), Separately Excited DC Motor, PWM, Arduino Uno.*

RINGKASAN

Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino; Muhammad Ana Fahrudin, 121910201088; 2019; 67 halaman; Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.

Dalam dunia industri, motor DC merupakan perangkat mesin listrik dinamis yang digunakan sebagai penggerak mesin produksi, dioperasikan sebagai motor listrik apabila di dalam motor listrik tersebut terjadi proses konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Motor DC dapat dioperasikan dengan kecepatan konstan, tetapi jika mendapatkan pembebanan ketika beroperasi maka kecepatan akan menurun dari kondisi yang telah ditentukan. Sistem pengaturan kecepatan motor DC umumnya menggunakan kontrol manual dan tidak ada atau masih jarang menggunakan kontrol otomatis untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap konstan sehingga dapat mempengaruhi hasil produksi pada suatu industri tersebut. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan sumber suplai tegangan kumparan medan dan kontrol otomatis pada motor DC penguat terpisah.

Untuk itu akan dirancang *buck converter* dengan mode pensaklaran *zero voltage switching* yang akan digunakan untuk mensuplai tegangan pada kumparan medan motor DC penguat terpisah dan akan dikontrol menggunakan PWM yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno sehingga kecepatan motor dapat berputar secara konstan. Penambahan mode pensaklaran *zero voltage switching* bertujuan untuk meningkatkan efisiensi *buck converter* tersebut. Serta nantinya akan dibandingkan dengan efisiensi dari *buck converter* konvensional.

Buck converter akan menghasilkan tegangan keluaran yang dikontrol melalui PWM Arduino Uno, kemudian tegangan keluaran tersebut akan disuplai pada kumparan medan motor DC penguat terpisah yang sudah diberi beban bervariasi dan *set point* yang telah ditentukan. Pengujian sistem kontrol secara otomatis pada motor DC penguat terpisah ini menggunakan variasi beban sebesar 15, 25, 40, 50, dan 65 watt dengan *set point* 800 rpm menghasilkan nilai

kestabilan kecepatan yang cukup baik dengan rata-rata presentase *error* sebesar 0,85%. Efisiensi tertinggi dari *buck converter* sebesar 92,83% dicapai pada mode pensaklaran *zero voltage switching* sedangkan pada mode pensaklaran konvensional didapatkan efisiensi sebesar 83,49% dimana masing-masing efisiensi didapatkan saat kondisi tegangan *input* sebesar 100V dan *duty cycle* 100%.



SUMMARY

Design Buck Converter With Zero Voltage Switching As A Speed Control Of Separately Excited DC Motor Based Arduino; Muhammad Ana Fahrudin, 121910201088; 2019; 67 pages; Department of Electrical Engineering, the Faculty of Engineering, University of Jember.

In the industrial world, DC motors are dynamic electric machine devices that are used to drive production machines, operated as electric motors when the electric motor is converted into electrical energy into mechanical energy. DC motors can be operated at constant speed, but if they get charged when operating, the speed will decrease from the conditions that have been determined. DC motor speed regulation systems generally use manual control and there is no or still rarely use automatic controls to keep the DC motor speed constant so that it can affect the production of an industry. To mitigate this, a field coil voltage supply and automatic control of a separately excited DC motor are needed.

For that purpose, the buck converter will be designed with zero voltage switching mode which will be used to supply the voltage on the separately excited DC motor field coil and will be controlled using a PWM controlled by the Arduino Uno microcontroller so that the motor speed can rotate constantly. The addition of zero voltage switching mode is intended to improve the efficiency of the buck converter. And later it will be compared with the efficiency of a conventional buck converter.

The Buck converter will produce an output voltage controlled via the Arduino Uno PWM, then the output voltage will be supplied to a separately excited DC motor field coil that has been given a varied load and a predetermined set point. Automatic control system testing on this separately excited DC motor uses load variations of 15, 25, 40, 50, and 65 watts with 800 rpm set points producing a fairly good speed stability value with an average percentage error of 0.85%. The highest efficiency of buck converter of 92.83% was achieved in zero voltage switching mode while in conventional switching mode efficiency was 83.49%

where each efficiency was obtained when the input voltage condition was 100V and the duty cycle was 100%.



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguatan Terpisah Berbasis Arduino”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M., selaku Dosen Pembimbing Utama, Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini;
3. Sumardi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
4. Seluruh Dosen Teknik Elektro yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember;
5. Ibu Siti Munawaroh dan Bapak Marjuki sekeluarga yang telah memberikan dorongan, semangat, kasih sayang, perhatian, kesabaran dan doa demi terselesaikannya skripsi ini;
6. Keluarga Besar Teknik Elektro Universitas Jember yang telah mendukung dengan segenap jiwa, cinta, dan rasa;
7. Keluarga Besar SATE UJ yang terus ada dan selalu setia;
8. Keluarga besar TK, SD, SMP, dan SMA yang telah mendoakan;
9. Siti Sahronih yang senantiasa memberikan support dan dukungan serta doanya;
10. Semua Pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 24 Januari 2019

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
RINGKASAN	x
<i>SUMMARY</i>	xii
PRAKATA	xiv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB 1. 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
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Motor DC Penguat Terpisah	4
2.1.1 Karakteristik Motor DC Penguat Terpisah	5
2.1.2 Prinsip Kontrol Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah	6
2.2 Pulse Width Modulation	7
2.3 Buck Converter	10
2.3.1 Prinsip Kerja DC Chopper Tipe Buck (<i>Buck Converter</i>)	12

2.3.2 Grafik Keluaran DC Chopper Tipe Buck (<i>Buck Converter</i>) ...	14
2.4 Zero Voltage Switching	15
2.5 Arduino Uno	18
2.6 Sensor Kecepatan	20
2.7 Sensor Tegangan	20
BAB 3. METODE PENELITIAN	22
3.1 Alat dan Bahan	22
3.2 Tahapan Penelitian	23
3.3 Diagram Blok Sistem	25
3.4 Flowchart	26
3.5 Perancangan Sistem Mikrokontroler Arduino Uno	27
3.6 Perancangan <i>Buck Converter</i> dengan <i>Zero Voltage Switching</i>	27
3.7 Sensor Tegangan	31
3.8 Sensor Kecepatan	32
3.9 Motor DC Penguat Terpisah	34
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Hasil Rancangan Keseluruhan Sistem	35
4.2 Pengujian <i>Rectifier</i>	35
4.3 Pengujian Sensor Tegangan	37
4.4 Pengujian Mikrokontroler Arduino Uno	38
4.5 Pengujian Program PWM	39
4.6 Pengujian Sensor Kecepatan	41
4.7 Pengujian <i>Buck Converter</i>	43
4.8 Pengujian Integrasi secara <i>Open Loop</i>	48
4.9 Pengujian Integrasi secara <i>Close Loop</i>	50
BAB 5. PENUTUP	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Spesifikasi Arduino Uno	19
3.1 Komponent Hardware <i>Buck Converter</i>	31
4.1 Pengujian <i>Rectifier</i>	36
4.2 Pengujian Sensor Tegangan	37
4.3 Tabel Pengujian Mikrokontroler Arduino Uno	39
4.4 Hasil Pengujian Sensor Kecepatan	42
4.5 Hasil Pengujian <i>Buck Converter ZVS</i> dengan Beban Motor DC	44
4.6 Hasil Pengujian <i>Buck Converter</i> Konvensional dengan Beban Motor DC ..	44
4.7 Hasil Pengujian Integrasi secara <i>Open Loop</i> , $V_{in} = 100$ volt	48
4.8 Hasil Pengujian Integrasi secara <i>Close Loop</i> , $V_{in} = 100$ volt	50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Rangkaian Ekuivalen Motor DC Penguat Terpisah	5
2.2 Karakteristik Torsi dan Kecepatan dengan Pengaturan Tegangan	6
2.3 Rangkaian PWM Analog	8
2.4 Pembangkitan Sinyal PWM dari Komparator Analog	8
2.5 Pembangkitan Sinyal PWM dengan Mikrokontroler	9
2.6 DC Chopper Tipe Buck	11
2.7 DC Chopper Tipe Buck dengan <i>Feedback</i>	12
2.8 Skema DC Chopper Tipe Buck	12
2.9 DC Chopper Tipe Buck dengan MOSFET ON	13
2.10 DC Chopper Tipe Buck dengan MOSFET OFF	13
2.11 Gekombang Keluaran DC Chopper Tipe Buck	14
2.12 Grafik Hubungan <i>Duty Cycle</i> dan Fungsi Alih	15
2.13 Rangkaian Pengubah <i>Half-Bridge</i> dengan Seri LC	16
2.14 Modul Mikrokontroler Arduino Uno	18
2.15 Rangkaian <i>Rotary Encoder</i>	20
2.16 Rangkaian Sensor Tegangan	21
3.1 Flowchart Tahapan Penelitian	23
3.2 Blok Diagram Sistem	25
3.3 Flowchart Sistem PWM	26
3.4 Rangkaian <i>Buck Converter</i> dengan <i>Zero Voltage Switching</i>	28
3.5 Rangkaian Sensor Tegangan	32
3.6 Modul Sensor IR Obstacle Avoidance	33
3.7 Rangkaian Sensor IR Obstacle Avoidance	33
3.8 Motor DC Penguat Terpisah	34
4.1 Hasil Rancangan Keseluruhan Sistem	35
4.2 Grafik Perbandingan $V_o(dc)$ Teori dan $V_o(dc)$ Praktek <i>Rectifier</i>	36
4.3 Grafik Perbandingan Multimeter dengan Sensor Tegangan	38
4.4 Sinyal PWM 40 KHz 0.2 V/div, 5 μ s/div <i>duty cycle</i> 40%	40

4.5	Sinyal PWM 40 KHz 0.2 V/div, 5 μ s/div <i>duty cycle</i> 70%	40
4.6	Grafik Pengujian Sensor Tegangan dengan Tachometer	42
4.7	Pengujian Rangkaian <i>Buck Converter</i>	43
4.8	Gambar 4.7 Grafik Hubungan Tegangan <i>Output Buck Converter</i> dengan <i>ZVS</i> Terhadap Kecepatan	45
4.9	Gambar 4.8 Grafik Hubungan Tegangan <i>Output Buck Converter</i> Konvensional Terhadap Kecepatan	46
4.10	Gambar 4.9 Grafik Hubungan Arus <i>Output Buck Converter</i> dengan <i>ZVS</i> Terhadap Kecepatan	46
4.11	Gambar 4.10 Grafik Hubungan Arus <i>Output Buck Converter</i> Konvensional Terhadap Kecepatan	47
4.12	Gambar 4.11 Grafik Hubungan Efisiensi dengan <i>Duty Cycle</i>	47
4.13	Grafik Pengujian Integrasi secara <i>Open Loop</i>	49
4.14	Grafik Pengujian Integrasi secara <i>Close Loop</i>	51

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. LISTING PROGRAM ARDUINO UNO.....	54
B. GAMBAR <i>HARDWARE</i>	60
B.1 <i>Buck Converter</i>	60
B.2 Motor DC Penguat Terpisah	60
B.3 Lampu Pijar.....	61
B.4 Keseluruhan Sistem.....	61
C. PERHITUNGAN EFISIENSI <i>BUCK CONVERTER</i>	62
C.1 Efisiensi <i>Buck Converter</i> dengan <i>Zero Voltage Switching</i>	62
C.2 Efisiensi <i>Buck Converter</i> Konvensional	63
D. PERHITUNGAN TORSI MOTOR DC PENGUAT TERPISAH	64
D.1 Perhitungan Torsi Motor DC Pada Pengujian <i>Buck Converter</i> dengan <i>Zero Voltage Switching</i>	64
D.2 Perhitungan Torsi Motor DC Pada Pengujian <i>Buck Converter</i> Konvensional	66

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor DC atau motor arus searah merupakan perangkat mesin listrik dinamis yang sudah ada lebih dari seabad karena dapat mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik dan sudah banyak digunakan sebagai penggerak mesin produksi di industri. Motor DC digunakan pada penggunaan khusus dimana diperlukan penyalaan torsi yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas. Selain itu, mempunyai kestabilan dalam pengaturan kecepatan kestabilan ini tidak dipengaruhi oleh frekuensi. Pengaturan kecepatan dapat dilakukan dengan mengatur tegangan yang ada pada kumparan medan, jangkar, atau keduanya (Chapman, 2005).

Motor DC dapat dioperasikan dengan kecepatan konstan, tetapi jika mendapatkan pembebanan ketika beroperasi maka kecepatan akan berkurang/berubah dari kondisi yang telah ditentukan. Jika beban yang ditumpu pada motor DC semakin besar maka kecepatan putar motor akan semakin kecil. Di industri, sistem pengaturan kecepatan motor DC umumnya menggunakan kontrol manual dan tidak ada atau masih jarang menggunakan kontrol otomatis untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap konstan. Hal ini dapat mempengaruhi hasil produksi pada suatu industri kurang optimal karena tidak adanya kontrol otomatis pada sistem pengaturan kecepatan motor DC sebagai penggerak pada proses produksi industri tersebut.

Dari permasalahan-permasalahan di atas, maka dalam penelitian ini akan dibuat suatu implementasi berupa konverter DC – DC sebagai kendali/kontrol motor DC penguat terpisah. Dengan mengatur tegangan kumparan medan yang ada pada motor DC diharapkan kecepatan motor menjadi tetap stabil/konstan. Jenis konverter DC-DC yang digunakan adalah *buck converter*, dimana *buck converter* ini dikontrol otomatis oleh mikrokontroler jenis Arduino Uno yang nantinya akan digunakan sebagai pengatur kecepatan motor DC penguat terpisah. Selain itu, dikembangkan pula proses pensaklaran pada *buck converter* dengan

menggunakan metode *zero voltage switching* untuk meminimalkan rugi-rugi pensaklaran dan meningkatkan efisiensi pada *buck converter* tersebut. *Buck converter* dengan *zero voltage switching* lebih diminati untuk daya rendah. Dalam konverter ini *soft switching* dicapai dengan menggunakan komponen resonansi. Nilai optimal komponen resonansi ditentukan dengan menggunakan fungsi elektrik yang berasal dari konfigurasi rangkaian. Jenis konverter resonansi ini menawarkan *electromagnetic interference* (EMI) yang sangat rendah dan menyajikan konfigurasi rangkaian dengan komponen paling sedikit untuk mewujudkan konverter resonansi dengan *zero voltage switching* yang sangat efisien (Suresh & Krishna, 2014).

Pada penelitian ini, motor DC digunakan sebagai penggerak beban yang berupa generator. Dimana nantinya akan diberi beban sehingga kecepatan motor DC penguat terpisah akan turun. Perubahan kecepatan motor ini akan dideteksi oleh sensor kecepatan yang kemudian hasilnya akan dikirim ke Arduino Uno. Hasil pembacaan ini akan dikirim pada *buck converter* berupa sinyal PWM, sehingga kecepatan motor dapat tetap terkontrol oleh tegangan motor pada sisi kumparan medan. Teknik PWM ini merupakan teknik pengaturan kecepatan motor DC penguat terpisah dengan cara mengubah-ubah besarnya *duty cycle* pulsa. *Duty cycle* pulsa inilah yang menentukan kecepatan motor. Besarnya amplitudo dan frekuensi pulsa adalah tetap, sedangkan besarnya *duty cycle* berubah-ubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penulisan ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang *buck converter* dengan *zero voltage switching* sebagai pengatur kecepatan motor DC penguat terpisah?
2. Bagaimana kinerja *buck converter* dengan *zero voltage switching* yang digunakan sebagai penggerak motor DC penguat terpisah?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan uraian rumusan masalah tersebut, maka pembahasan pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Pengaturan kecepatan motor DC dilakukan dengan mengatur tegangan pada sisi kumparan medan.
2. Sistem kontrol yang digunakan menggunakan metode *increment – decrement* untuk menjaga agar kecepatan motor tetap konstan sesuai *set point* yang telah ditentukan.
3. Driver motor DC penguat terpisah ini menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*).
4. Pengujian beban yaitu dengan cara mengkopel motor DC dengan generator DC dan memberi variasi beban lampu pijar sebesar 15, 25, 40, 50, dan 65 watt.

1.4 Tujuan

Penelitian ini dilakukan karena memiliki beberapa tujuan, diantaranya :

1. Mengetahui sistem dan karakteristik motor DC penguat terpisah.
2. Membuat sistem kontrol otomatis pada motor DC penguat terpisah.
3. Menerapkan sistem kontrol dengan menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dihasilkan Arduino agar tetap konstan dalam kondisi berbeban.

1.5 Manfaat

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat diantaranya :

1. Mengatasi kelemahan dari motor DC penguat terpisah.
2. Tegangan kumparan medan pada motor DC akan diatur secara otomatis oleh sistem kontrol dengan metode *increment – decrement*.
3. Penggunaan beban pada motor DC penguat terpisah yang lebih besar tidak menurunkan tegangan *output*.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor DC Penguat Terpisah

Motor DC penguat terpisah merupakan jenis motor DC yang penguatannya terpisah. Artinya motor ini memiliki suplai tegangan yang yang berbeda sehingga tegangan penguatannya bisa diubah-ubah tanpa mempengaruhi tegangan suplainya. Dapat juga diartikan sebagai penambah kemampuan daya dan kecepatan karena memiliki fluks medan (Φ) yang dihasilkan oleh kumparan medan, yang terletak secara terpisah dan mempunyai sumber pembangkit tersendiri berupa tegangan DC. Sehingga motor DC penguat terpisah ini sangat memungkinkan untuk dapat membangkitkan fluks medan (Φ) bila dibandingkan dengan menggunakan motor dc magnet permanen. Karena motor dc penguat terpisah mempunyai fleksibilitas dalam pengontrolan. Maka dari itu dapat kita amati persamaan dasar motor DC sebagai berikut :

$$V = E_a + I_a R_a \quad (2.1)$$

$$E = c n \Phi \quad (2.2)$$

$$V_t = c n \Phi + I_a R_a \quad (2.3)$$

$$n = \frac{V_t - I_a R_a}{c \Phi} \quad (2.4)$$

Keterangan :

n = Kecepatan (rpm)

c = Konstanta

R_a = Tahanan Jangkar (Ohm)

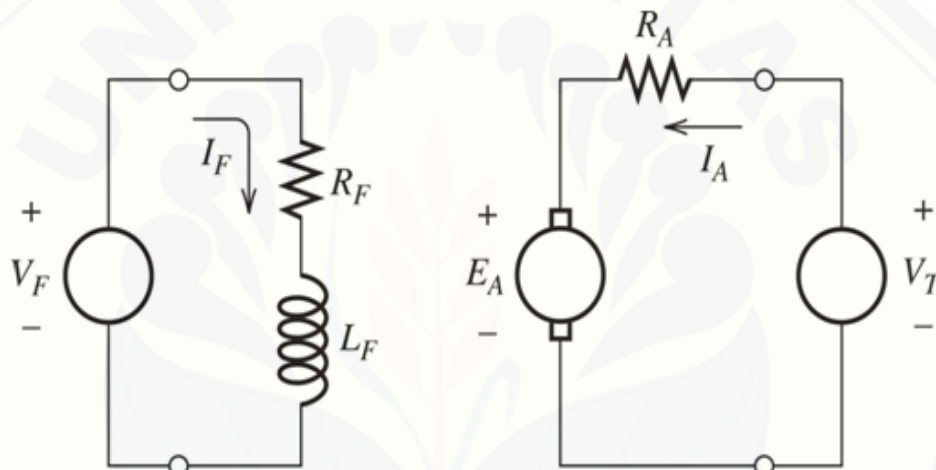
V_t = Tegangan jepit motor (Volt)

I_a = Arus jangkar (Ampere)

Φ = Fluks magnet (Wb)

Aplikasi secara umum, fluks medan diusahakan tetap dalam kondisi yang konstan, sedangkan untuk tegangan suplai motor dc ditambah secara linear,

hingga diperoleh kecepatan nominal dari motor. Ketika kecepatan yang diinginkan tersebut telah diperoleh, langkah kedua adalah menjaga agar kondisi tersebut tetap stabil tidak melebihi kecepatan nominal, maka tegangan suplai dibiarkan dalam kondisi konstan dan fluks pada kumparan medan diperkecil dengan mengurangi arus medan (I_f) yang diberikan. Pada keadaan ini terjadi pelemahan kerja pada sisi kumparan medan (field Weaking) dan kecepatan motor dc tersebut dapat mencapai 50% s/d 100% dari kecepatan nominal motor. Berikut rangkaian ekivalen motor dc penguat terpisah ditunjukkan seperti pada Gambar 2.1 di bawah ini



Gambar 2.1 Rangkaian Ekivalen Motor DC Penguat Terpisah

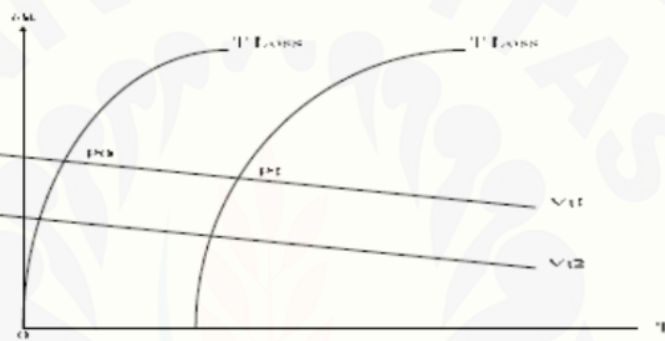
2.1.1 Karakteristik Motor DC dengan Penguat Terpisah

Jika tegangan suplai yang diberikan pada kumparan medan diatur dalam kondisi konstan pada suatu harga maksimum dari motor, maka fluks motor (Φ) yang dibangkitkan menjadi besar, sehingga untuk harga V_t bernilai konstan.

Hubungan antara nilai torsi motor dan kecepatan motor dapat dipresentasikan dengan hubungan antara dua buah garis lurus dengan kemiringan garis gradien negatif yang kecil dengan perpotongan yang terletak pada sumbu kecepatan seperti pada Gambar 2.2. Apabila proses dari motor tersebut dihubungkan pada suatu sistem mekanik (dalam hal ini motor diberi beban/terbebani) maka sistem akan bekerja pada poin (P1), yang mana merupakan

titik pertemuan antara dua buah garis. Sedangkan jika motor tidak dihubungkan pada suatu mekanik (dalam hal ini motor tidak diberi beban atau tidak terbebani), motor akan beroperasi pada posisi poin (P0).

Untuk kumparan jangkar yang disuplai oleh sumber yang terkontrol dari tegangan searah, maka kecepatannya dapat diatur mulai dari nol sampai harga V_t sama dengan harga tegangan maksimum. Nilai range dari V_{t2} akan mengikuti karakteristik dari tegangan V_{t1} . Gambar 2.2 berikut merupakan gambar karakteristik torsi dan kecepatan melalui pengaturan tegangan jangkar.



Gambar 2.2 Karakteristik Torsi dan Kecepatan dengan Pengaturan Tegangan

2.1.2 Prinsip Kontrol Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah

Rangkaian ekuivalen dari motor dc penguat terpisah pada sumber tegangan kumparan jangkar dan kumparan medan dalam posisi terpisah. Dari rangkaian tersebut diperoleh suatu persamaan :

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \text{ Volt} \quad (2.5)$$

$$V_t = k \cdot \phi \cdot \omega_m + L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a \cdot I_a \text{ Volt} \quad (2.6)$$

$$T_i = k \cdot \phi \cdot I_a - j \frac{d\omega_m}{dt} - T_{\text{loss}} \text{ Nm} \quad (2.7)$$

Pada keadaan steady state, turunan terhadap fungsi waktu adalah nol (0) dan jika variable I_f , I_a , dan ω_m konstan, maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$V_f = R_f \cdot I_f \text{ Volt} \quad (2.8)$$

$$V_t = k \cdot \phi \cdot \omega \cdot m + R_a \cdot I_a \text{ Volt} \quad (2.9)$$

$$T_i = k \cdot \phi \cdot I_a - T_{\text{loss}} \text{ Nm} \quad (2.10)$$

Tegangan dari ggl lawan yang dibangkitkan pada kumparan jangkar motor pada saat motor bekerja dapat ditulis dengan suatu persamaan sebagai berikut :

$$e_a = k \cdot \phi \cdot \omega \cdot m \text{ Volt} \quad (2.11)$$

Saat motor start, nilai ggl lawan adalah nol, sehingga arus pada kumparan jangkar cukup besar. Untuk persamaan torsi internal pada motor diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$T = k \cdot \phi \cdot I_a \text{ Nm} \quad (2.12)$$

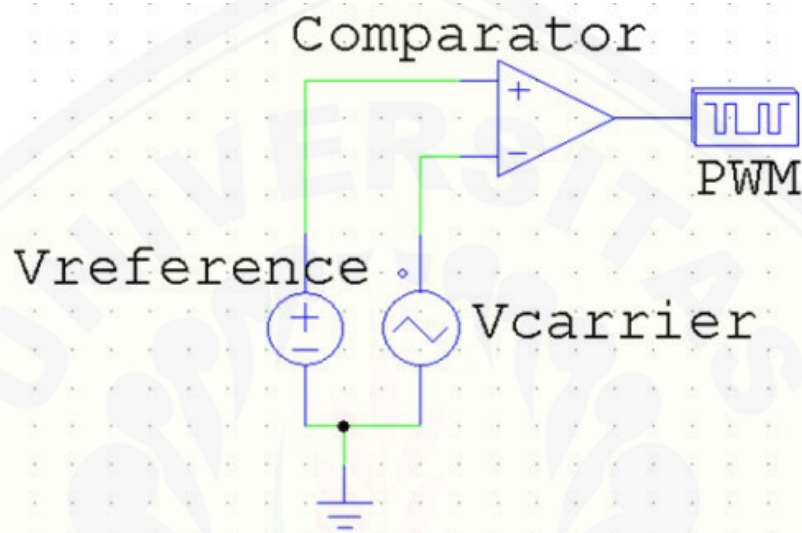
$$\omega m = \frac{V_t}{k \cdot \phi} - \frac{R_a \cdot T}{(k \cdot \phi)} \quad (2.13)$$

Beberapa metode yang digunakan untuk mengatur kecepatan dari motor dc penguat terpisah mengacu pada (pers 2.5). Pada kondisi steady state, kecepatan motor dc dapat dikontrol langsung dengan mengatur nilai tegangan terminal jangkar V_t , dapat juga diatur melalui besarnya fluks (Φ) pada kumparan medan dengan cara menambah arus medan (I_f), dari kedua metode ini dapat dikombinasikan untuk mendapatkan range pengaturan kecepatan yang lebih baik.

2.2 Pulse Width Modulation (PWM)

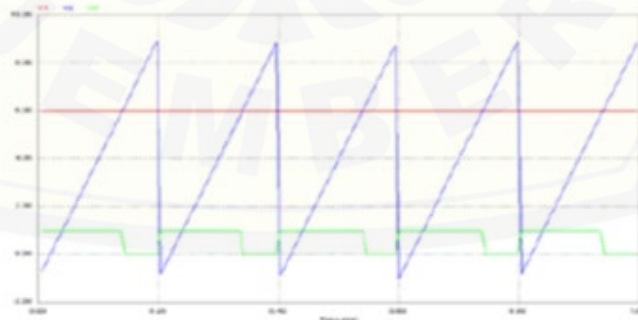
PWM atau *Pulse Width Modulation* merupakan PWM merupakan teknik modulasi dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. Satu siklus pulsa merupakan kondisi *high* kemudian berada di zona transisi ke kondisi *low*. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. *Duty Cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk

(%) dengan *range* 0% sampai 100%. Pembangkitan sinyal PWM dapat dihasilkan menggunakan metode analog dan digital. Metode analog, pembangkitan sinyal PWM yang paling sederhana dengan cara membandingkan sinyal gigi gergaji sebagai tegangan carrier dengan tegangan referensi menggunakan rangkaian op-amp comparator. Berikut merupakan rangkaian PWM analog.



Gambar 2.3 Rangkaian PWM Analog

Cara kerja dari komparator analog ini adalah membandingkan gelombang tegangan gigi gergaji dengan tegangan referensi seperti yang terlihat pada Gambar 2.4 di bawah ini

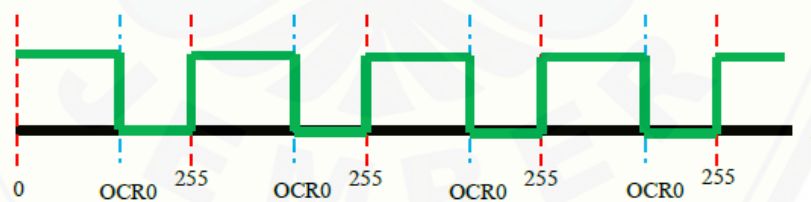


Gambar 2.4 Pembangkitan Sinyal PWM dari Komparator Analog

Saat nilai tegangan referensi lebih besar dari tegangan *carrier* (gigi gergaji) maka *output* comparator akan bernilai *high*. Namun saat tegangan

referensi bernilai lebih kecil dari tegangan *carrier*, maka *output* komparator akan bernilai *low*. Dengan memanfaatkan prinsip kerja dari komparator inilah, untuk mengubah *duty cycle* dari sinyal *output* cukup dengan mengubah-ubah besar tegangan referensi.

Teknik pembangkitan pulsa yang lain adalah dengan cara kontrol digital yang salah satu contohnya adalah menggunakan mikrokontroler. Seperti halnya pembangkitan PWM dengan rangkaian analog, pembangkitan pulsa dengan menggunakan kontrol mikrokontroler juga menggunakan cara perbandingan dua buah nilai. Jika pada rangkaian analog nilai yang dibandingkan adalah dua buah sinyal tegangan (tegangan referensi dengan tegangan *carrier*), pembangkitan PWM pada mikrokontroler adalah dengan membandingkan dua buah variabel yang tersimpan dalam memori mikrokontroler. Yaitu variabel TCNTx dengan OCRxx (salah satu contohnya). Apabila timer yang digunakan adalah timer 0, maka variabel yang dipakai adalah TCNT0 dan OCR0. TCNT0 adalah suatu variabel yang nilainya terus bertambah setiap satu satuan waktu (bergantung pada setting timer) yang jika dianalogikan ke rangkaian analog adalah sinyal ramp. Sedangkan OCR0 adalah suatu variabel yang berfungsi sebagai nilai referensi kapan output PWM berubah dari high ke low ataupun sebaliknya. Keadaan ini dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.5



Gambar 2.5 Pembangkitan Sinyal PWM dengan Mikrokontroler

Apabila menginginkan gelombang kotak yang mempunyai waktu ON dan OFF berkebalikan maka diperlukan tegangan dc referensi yang negatif. Untuk memperoleh tegangan DC negatif adalah dengan memasukkan tegangan DC positif ke rangkaian pembalik (*inverting*).

2.3 Buck Converter

Buck converter adalah salah satu konverter DC-DC yang dapat menurunkan tegangan DC berdasarkan *duty cycle* mosfet pada rangkaian *buck converter*. Konverter ini biasa juga disebut DC chopper. Rangkaian *buck converter* terdiri atas satu saklar aktif (MOSFET) dan satu saklar pasif (dioda). Untuk tegangan kerja yang rendah, saklar pasif sering diganti dengan saklar aktif sehingga susut daya yang terjadi bisa dikurangi. Kedua saklar ini bekerja bergantian. Setiap saat hanya ada satu saklar yang menutup. Nilai rata-rata tegan keluaran konverter sebanding dengan rasio antara waktu penutupan saklar aktif terhadap periode pensaklarannya (faktor kerja). Nilai faktor kerja bisa diubah dari nol sampai satu. Akibatnya nilai rata-rata tegangan keluaran selalu lebih rendah dibanding tegangan masukannya.

Beberapa konverter buck bisa disusun paralel untuk menghasilkan arus keluaran yang lebih besar. Jika sinyal ON-OFF masing-masing konverter berbeda sudut satu sama lainnya sebesar $360^\circ/N$, yang mana N menyatakan jumlah konverter, maka didapat konverter DC-DC N-fasa. Konverter buck N-fasa inilah yang sekarang banyak digunakan sebagai regulator tegangan mikroprosesor generasi baru. Dengan memperbanyak jumlah fasa, ukuran tapis yang diperlukan bisa menjadi jauh lebih kecil dibanding konverter DC-DC satu-fasa. Selain digunakan sebagai regulator tegangan mikroprosesor, konverter buck multifasa juga banyak dipakai dalam industri logam yang memerlukan arus dc sangat besar pada tegangan yang rendah. Berikut persamaan tegangan *output buck converter* dan rangkaian DC Chopper Tipe Buck (Buck Converter) yang ditunjukkan seperti pada Gambar 2.6 di bawah ini.

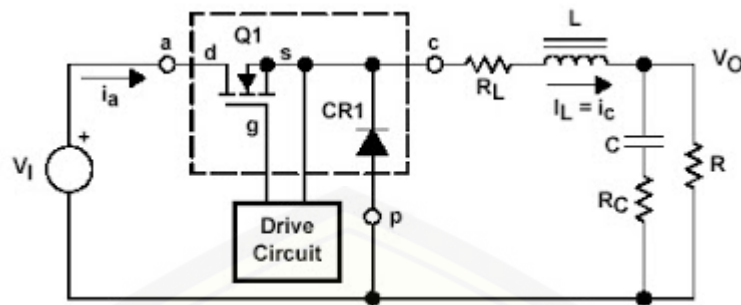
$$V_o = D \times V_s \quad (2.15)$$

Keterangan :

V_o = Tegangan output (volt)

D = Duty cycle PWM

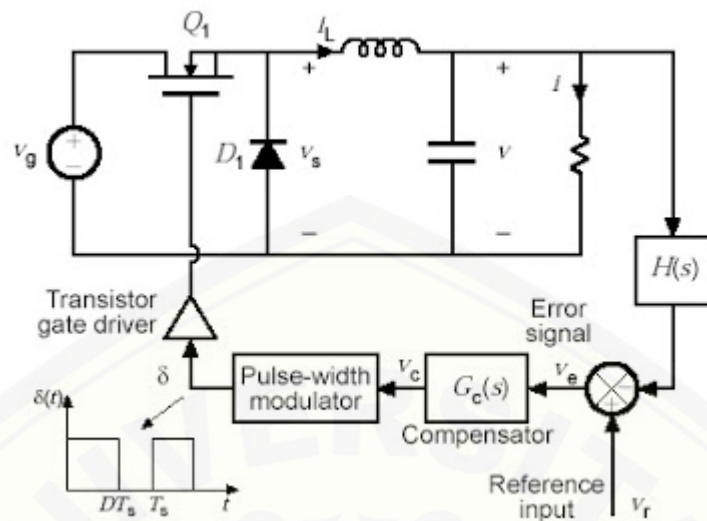
V_s = Tegangan input (volt)



Gambar 2.6 DC Chopper Tipe Buck

Secara umum, komponen-komponen yang menyusun DC Chopper Tipe Buck (*Buck Converter*) adalah sumber masukan DC, MOSFET, Dioda Freewheeling, Induktor, Kapasitor, Rangkaian Kontrol (*Drive Circuit*), serta Beban (R). MOSFET digunakan untuk mencacah arus sesuai dengan duty cycle sehingga keluaran DC Chopper dapat sesuai dengan yang diinginkan. Rangkaian Kontrol digunakan untuk mengendalikan MOSFET, sehingga MOSFET mengetahui kapan dia harus membuka dan kapan harus menutup. Induktor digunakan untuk menyimpan energi dalam bentuk arus. Energi tersebut disimpan ketika MOSFET on dan dilepas ketika MOSFET off. Dioda Freewheeling digunakan untuk mengalirkan arus yang dihasilkan induktor ketika MOSFET off.

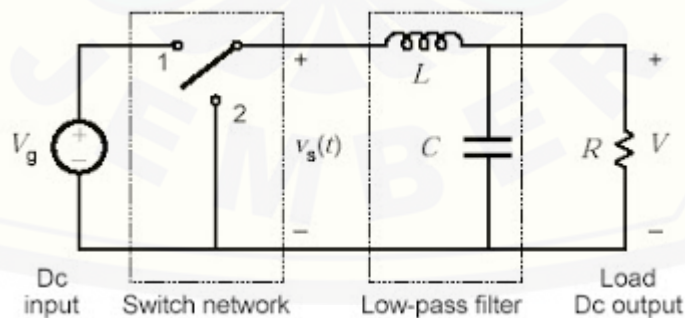
Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang konstan, DC Chopper Tipe Buck dapat ditambah dengan rangkaian *feedback* (umpan balik). Pada rangkaian *feedback* ini, tegangan keluaran dari DC Chopper akan dibandingkan dengan tegangan referensi, selisih keduanya akan digunakan untuk menentukan duty cycle yang perlu ditambah atau dikurang sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang konstan. Berikut adalah rangkaian DC Chopper Tipe Buck dengan *feedback*.



Gambar 2.7 DC Chopper Tipe Buck dengan *feedback*

2.3.1 Prinsip Kerja DC Chopper Tipe Buck (*Buck Converter*)

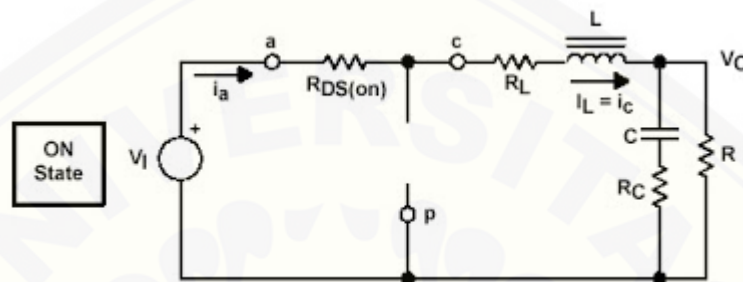
MOSFET yang digunakan pada rangkaian DC Chopper Tipe Buck adalah bertindak sebagai saklar yang dapat membuka atau menutup rangkaian sehingga arus dapat dikendalikan sesuai dengan duty cycle yang diinginkan. Berikut adalah skema secara umum dari DC Chopper Tipe Buck.



Gambar 2.8 Skema DC Chopper Tipe Buck

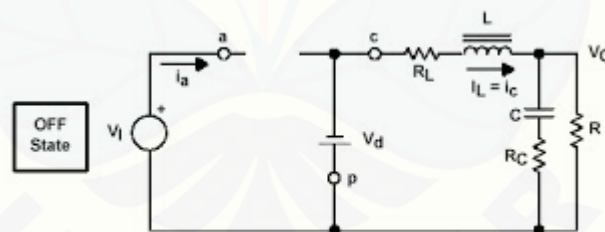
Kinerja dari DC Chopper tipe buck dapat dibagi menjadi 2 kerja utama, yaitu :

- Ketika MOSFET on (tertutup) dan dioda off, arus mengalir dari sumber menuju ke induktor (pengisian induktor), disaring dengan kapasitor, lalu ke beban, kembali lagi ke sumber.



Gambar 2.9 DC Chopper Tipe Buck dengan MOSFET ON

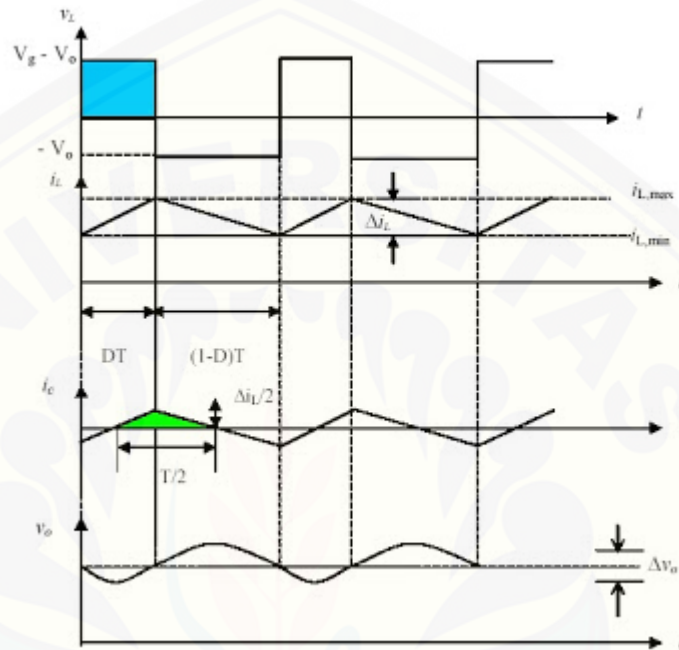
- Ketika MOSFET off (terbuka) dan dioda on, arus yang disimpan induktor dikeluarkan menuju ke beban lalu ke dioda freewheeling dan kembali lagi ke induktor.



Gambar 2.10 DC Chopper Tipe Buck dengan MOSFET OFF

2.3.2 Grafik Keluaran DC Chopper Tipe Buck (*Buck Converter*)

Dari rangkaian DC Chopper Tipe Buck seperti diatas, didapatkan hasil gelombang keluaran seperti dibawah ini :



Gambar 2.11 Gelombang Keluaran DC Chopper Tipe Buck

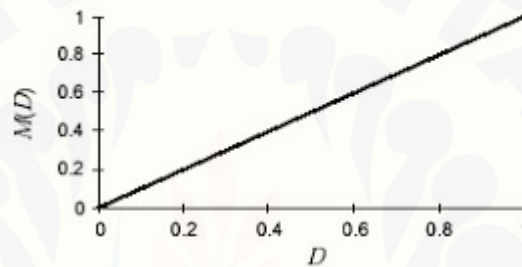
Dari gambar dapat dilihat bahwa arus pada beban (i_L) merupakan arus DC dimana jika kita rata-rata arus beban tersebut, maka kita dapatkan bukan bernilai nol. Lebar periode dari arus beban (i_L) bergantung pada frekuensi yang diberikan oleh rangkaian kontrol. Posisi titik tertinggi arus beban (i_L) dipengaruhi oleh besarnya duty cycle yang diberikan oleh rangkaian kontrol.

Semakin besar duty cycle, maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan DC Chopper Tipe Buck. Namun, tegangan keluaran tersebut selalu lebih kecil atau sama dengan tegangan masukan DC Chopper. Semakin besarnya duty cycle dapat dilihat dari semakin besarnya area yang diwarnai biru muda pada gambar diatas.

Fungsi alir dari DC Chopper tipe Buck / $M(D)$ adalah sebagai berikut :

$$M(D) = \frac{V_{output}}{V_{input}} \quad (2.16)$$

Berikut adalah grafik hubungan duty cycle dengan fungsi alir dari DC Chopper Tipe Buck



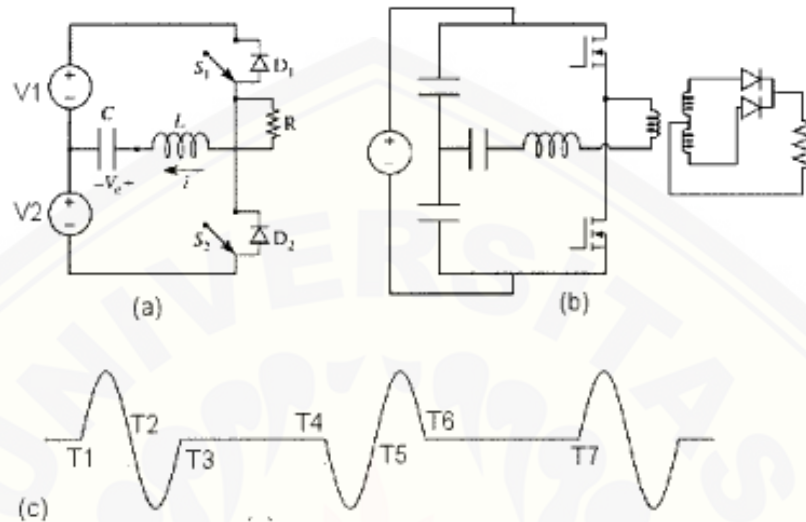
Gambar 2.12 Grafik Hubungan *Duty Cycle* dan Fungsi Alih

Semakin besar duty cycle (D), maka semakin besar pula fungsi alihnya / $M(D)$. Begitu pula sebaliknya, semakin kecil duty cycle (D), maka semakin kecil pula fungsi alihnya / $M(D)$.

2.4 Zero Voltage Switching

Zero voltage switching merupakan metode yang dikembangkan untuk meminimalkan rugi-rugi pensaklaran. Rugi pensaklaran terjadi pada saat transisi pensaklaran berlangsung karena hadirnya tegangan dan arus yang melalui piranti pensaklar. Oleh karena itu jika kita dapat menihilkan tegangan atau pun arus pada saat transisi tersebut maka, rugi pensaklaran pun akan dapat dihilangkan. Pada rangkaian seri LC, kita dapat membuat rangkaiannya ber-resonansi sehingga tegangan dan arus pun secara otomatis akan mengalami titik keadaan nol dengan tanpa bantuan piranti pensaklar. Demikian pula dengan rangkaian paralel LC,

dapat dirancang supaya tegangan dan arus saat bertransisi mengalami titik keadaan nol. Kedua rangkaian ini lah yang menjadi kunci dari metoda resonansi pada sistim perubahan daya.



Gambar 2.13 Rangkaian Pengubah *Half-Bridge* dengan seri LC

Sebagai contoh, pada gambar (a) terlihat rangkaian *half-bridge* dengan dua sumber daya DC, V_1 dan V_2 , yang identik dengan rangkaian seri LC di dalamnya. Beban resistor R dihubungkan secara seri dengan rangkaian seri LC. Pada prakteknya, beban R ini sebenarnya terdapat pada sisi sekunder dari trafo penginsulasi seperti terlihat pada gambar (b). Disamping itu untuk memudahkan analisa, rangkaian penyangkutan tidak diperlihatkan pada gambar (b). Ada dua piranti penyakelar, S_1 and S_2 , yang umumnya menggunakan MOSFET. Dalam pengoperasiannya, ketika S_1 disambung (*turned on*) pertama kalinya pada saat T_1 , gambar (c), tegangan V_1 akan jatuh pada rangkaian seri LC dan beban R . Tegangan yang jatuh pada beban seharusnya tidak begitu besar sehingga rangkaian menjadi *underdamped* dan arus pada rangkaian pun menjadi terosilasi seperti pada gambar (c). Arus tersebut akan mengisi kapasitor C , tegangan V_C , sampai batas maksimum tegangan positif. Pada saat V_C mencapai maksimum, pada titik T_2 , arus menjadi nol. Karena keberadaan dioda D_1 , setelah arus menjadi nol, kapasitor dengan segera melepas simpanan energinya sehingga arus pun kembali muncul cuma dengan arah yang berbeda (arah negatif atau ke kanan).

Ini terjadi dari titik T2 ke T3. Karena arus melewati dioda D1 dan karena penyalakel S1 dihubungkan secara paralel dengan D1 maka tegangan yang jatuh pada penyalakel S1 pun akan menjadi sangat kecil, yaitu sebesar drop tegangan maju pada dioda D1. Maka dari itu, pada periode T2 sampai T3 inilah penyalakel S1 dapat di putus (*turned off*) tanpa rugi penyalakelaran yang berarti. Pengoperasian seperti ini yang kemudian disebut sebagai penyalakelaran tegangan nol (*Zero-Voltage Switching*). Pada saat penyalakelaran S1 pertama kalinya pada titik T1 kita mendapatkan apa yang disebut sebagai penyalakelaran arus nol (*Zero-Current Switching*), karena arus pada rangkaian bermula dari nol. Demikian pula pada saat penyambungan dioda D1 pada titik T2, terjadi ketika arus melewati nol. Dioda D1 terputus pada T3 ketika arus rangkaian juga nol, kembali menghasilkan fenomena *zero-current switching*. Setelah titik T3, kapasitor telah selesai menghabiskan semua energinya sehingga arus pada rangkaian pun kembali menjadi nol.

Arus berikutnya dimulai ketika S2 disambung pada T4. Kembali, operasi yang serupa berlangsung seperti pada proses penyambungan dan pemutusan penyalakel S1 sebelum ini. Namun perlu diingat, seperti yang diilustrasikan pada gambar (c), arah arus pada rangkaian segera setelah S2 disambungkan akan sama dengan arus yang terjadi pada periode setelah T2 (ke kanan). Kembali dari T4 ke T5 menunjukkan proses pengisian kapasitor C, dan pada titik T5, tegangan kapasitor VC mencapai maksimum sehingga arus menjadi nol. Segera setelah T5, kapasitor mulai melepaskan energinya melalui perantaraan dioda D2 yang memungkinkan arus memutarai rangkaian dengan arah yang berlawanan (ke kiri). Satu periode penyalakelaran berakhir sampai pada titik T7, dimana penyalakelaran S1 berlangsung kembali dan proses yang serupa kembali berjalan. Perlu diperhatikan bahwa pada metoda resonansi, terdapat dua macam periode. Pertama adalah periode penyalakelaran (*switching period*) yang pada gambar (c) terjadi dari titik T1 sampai titik T7. Yang kedua adalah periode resonansi, dan ini terjadi dari titik T1 ke T3 atau dari titik T4 ke titik T6. Selain itu, terdapat selang waktu dimana arus pada rangkaian tetap nol, seperti dari titik T3 ke T4, dan dari titik T6 ke T7. Kekosongan dalam kedua selang waktu tersebut terjadi karena periode penyalakelaran lebih besar dari periode resonansi. Oleh karena itu, jika periode

penyakelaran dikecilkan atau dengan kata lain frekuensi penyakelaran ditinggikan, maka selang waktu yang kosong tersebut akan semakin pendek. Semakin pendek selang waktu yang kosong, maka semakin besar tegangan ataupun daya keluaran yang dihasilkan. Dengan cara demikian, yaitu dengan pengaturan perioda penyakelaran, maka kita dapat mengatur seberapa banyak tegangan atau daya keluaran yang kita inginkan pada beban.

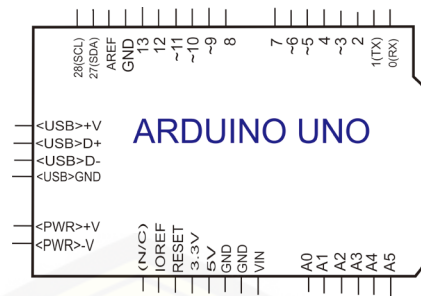
2.5 Arduino Uno

Arduino Uno adalah modul mikrokontroler berbasis ATmega 328. Modul ini memiliki empat belas pin *input – output* (14 I/O) di mana enam diantaranya dapat digunakan sebagai *output pulse width modulation* (PWM), enam *input analog*, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, tombol *reset* dan koneksi ke catu daya. Kontroler ini semua yang dibutuhkan untuk mendukung mikrokontroler.

“Uno” berarti satu dalam bahasa Itali dan hal ini untuk menandai versi pertama (Arduino 1.0) yang akan menjadi versi acuan bagi Arduino berikutnya. Uno adalah seri terakhir dari seri papan atau modul USB Arduino Uno tidak lagi menggunakan *chip* FTDI USB-to-serial tetapi menggunakan Atmega 8U2 sebagai konverter USB ke serial. Gambar 2.15 (a) adalah modul Arduino Uno R3 sedangkan Gambar 2.15 (b) menunjukkan skema dari modul Arduino Uno R3 yang merupakan penyederhanaan dari gambar modul aslinya (Arduino UNO 2015).



(a)



(b)

Gambar 2.14 Modul Kontroler Arduino Uno

(Sumber : www.arduino.com)

Masing-masing pin I/O dapat digunakan sebagai *input* maupun *output* dengan menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Masing-masing pin ini beroperasi pada tegangan 5 volt dan dapat menerima arus 40 mA serta sudah memiliki *pull-up* resistor 20-50 k Ω yang secara *default* tidak tersambung (*disconnected*).

Berikut ini adalah tabel spesifikasi dari Arduino Uno dapat kita lihat pada tabel 2.1 dibawah ini.

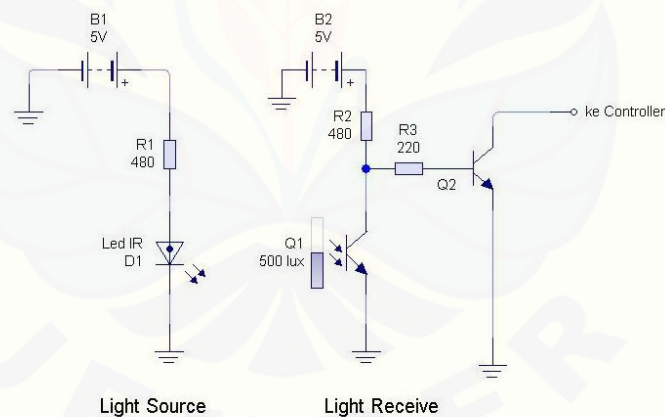
Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Uno

<i>Device</i>	Keterangan
<i>Microcontroller</i>	ATmega328P
<i>Operating Voltage</i>	5V
<i>Input Voltage (recommended)</i>	7-12V
<i>Input Voltage (limit)</i>	6-20V
<i>Digital I/O Pins</i>	14 (of which 6 provide PWM output)
<i>PWM Digital I/O Pins</i>	6
<i>Analog Input Pins</i>	6
<i>DC Current per I/O Pin</i>	20 mA
<i>DC Current for 3.3V Pin</i>	50 mA
<i>Flash Memory</i>	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
<i>Clock Speed</i>	16 MHz
LED_BUILTIN	13
<i>Length</i>	68.6 mm
<i>Width</i>	53.4 mm
<i>Weight</i>	25 g

2.6 Sensor Kecepatan

Rotary encoder tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan. LED ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya akan menuju ke piringan. Di sisi yang lain suatu photo-transistor diletakkan sehingga photo-transistor ini dapat mendeteksi cahaya dari LED yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikopel dengan poros motor, atau divais berputar lainnya yang ingin kita ketahui posisinya, sehingga ketika motor berputar piringan juga akan ikut berputar. Apabila posisi piringan mengakibatkan cahaya dari LED dapat mencapai photo-transistor melalui lubang-lubang yang ada, maka photo-transistor akan mengalami saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi.

Gambar 2.14 menunjukkan bagan skematik sederhana dari rotary encoder. Semakin banyak deretan pulsa yang dihasilkan pada satu putaran menentukan akurasi rotary encoder tersebut, akibatnya semakin banyak jumlah lubang yang dapat dibuat pada piringan menentukan akurasi rotary encoder tersebut.

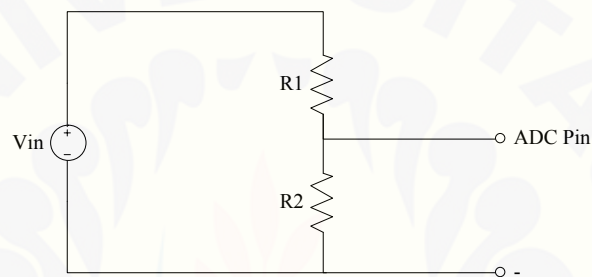


Gambar 2.15 Rangkaian *rotary encoder*

2.7 Sensor Tegangan

Sensor tegangan DC adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi tegangan dari listrik arus searah dengan keluaran tegangan analog untuk ADC pada mikrokontroler sebesar 5 Volt. Sensor ini berprinsip pada rangkaian pembagi tegangan yaitu menggunakan 2 resistor yang dirangkai secara seri seperti

ditunjukkan pada gambar 2.16, pada sensor ini harus memiliki daya yang rendah agar tidak membuang energi listrik yang dikeluarkan oleh sumber energi listrik pada sensor tegangan DC tersebut. Oleh karena itu nilai resistor yang digunakan harus memiliki nilai resistansi yang tinggi. V_{in} adalah tegangan *input* pada sensor tegangan, R_1 dan R_2 adalah resistor pembanding agar keluaran V_o untuk masukkan PIN ADC pada mikrokontroler ketika tegangan V_{in} tertinggi mengeluarkan tegangan 5 Volt, dengan persamaan untuk mencari nilai – nilai resistor R_1 dan R_2 ditunjukkan pada persamaan 2.4 (Autodesk.Inc, 2015).



Gambar 2.16 Rangkaian Sensor Tegangan

$$V_o = V_{in} \times \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2.17)$$

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

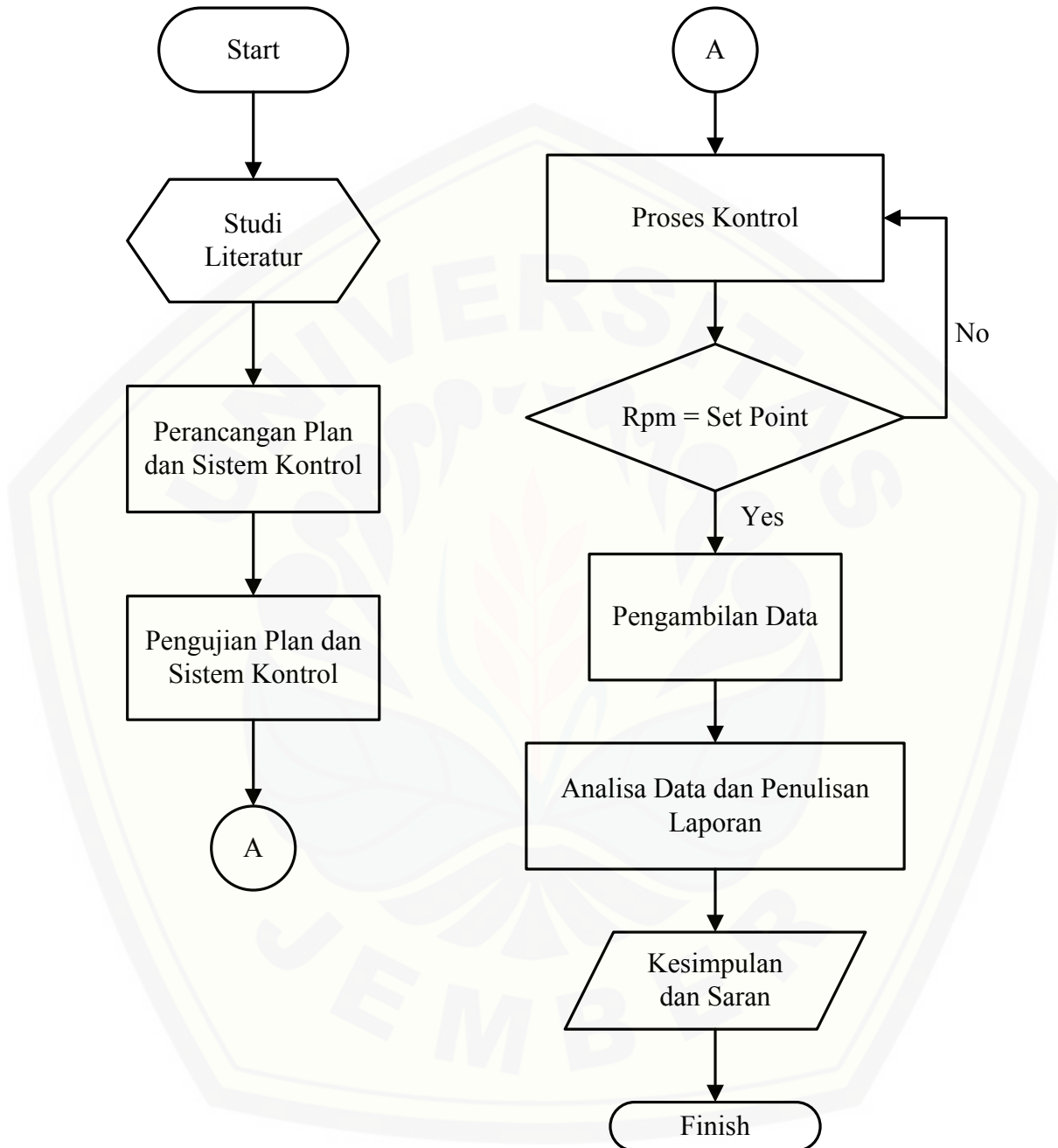
Alat :

1. Multimeter
2. Tachometer
3. Laptop

Bahan :

1. Generator DC 1 fasa
2. Motor DC
3. *Belt*
4. *AVR (Automatic Voltage Regulator)*
5. Arduino Uno
6. Sensor tegangan
7. Sensor kecepatan
8. *Buck converter*
9. *Rectifier*
10. MCB
11. Lampu pijar
12. *Jumper*

3.2 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Tahapan Penelitian

Di bawah ini adapun tahapan penelitian rancang bangun *buck converter* dengan *zero voltage switching* sebagai pengatur kecepatan motor DC penguat terpisah berbasis Arduino adalah sebagai berikut.

1. Studi Literatur

Pada tahap ini penelitian dilakukan dengan mencari literatur yang terkait dengan penelitian ini, dengan tujuan agar perancangan dan pelaksanaan penelitian dapat sesuai dengan yang diinginkan.

2. Perancangan Plan dan Sistem Kontrol

Tahap ini merupakan proses perancangan plan dan sistem kontrol yang berupa *buck converter*, sensor tegangan, sensor kecepatan, program, dan PWM Arduino Uno.

3. Pengujian Plan dan Sistem Kontrol

Tahap ini merupakan pengujian plan dan sistem yang berupa *buck converter*, sensor tegangan, sensor kecepatan, program, dan PWM Arduino Uno. Hal ini bertujuan untuk mengetahui plan dan sistem yang dirancang berjalan sesuai perancangan atau tidak.

4. Pemrograman Sistem Kontrol

Tahap ini merupakan pemrograman sistem kontrol yang ada pada Arduino Uno. Penentuan *set point* dilakukan dengan mengatur PWM Arduino Uno agar sesuai dengan target yang kita inginkan.

5. Pengujian dan Pengambilan Data

Tahap ini merupakan tahap pengujian dan pengambilan data dari rancang bangun *buck converter* dengan *zero voltage switching* sebagai pengatur kecepatan motor DC penguat terpisah berbasis Arduino. Pengujian dan pengambilan data juga menggunakan variasi beban yang telah ditentukan.

6. Analisa Data dan Penulisan Laporan

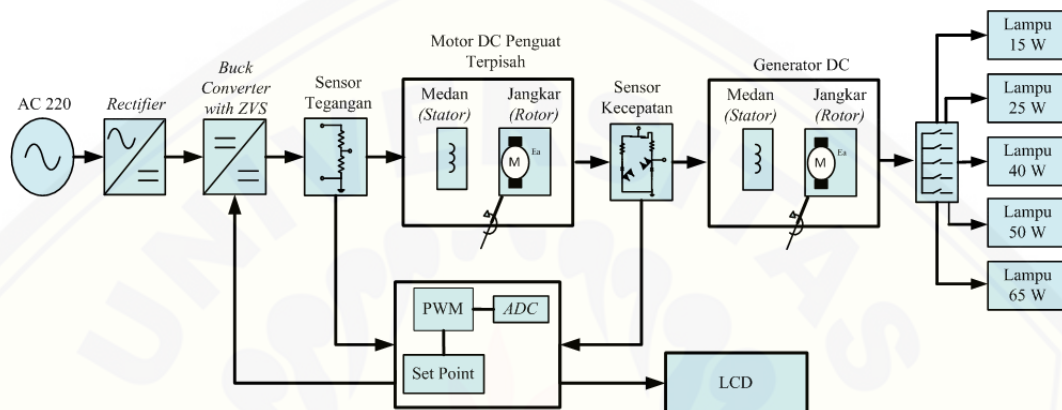
Tahap ini adalah melakukan analisa data yang diperoleh dari hasil pengujian yang sudah dilakukan pada tahap sebelumnya, yang kemudian akan dipaparkan dalam bentuk laporan.

7. Kesimpulan dan Saran

Tahap ini merupakan tahap terakhir dalam penelitian, dimana penulis memberikan kesimpulan dari pengujian dan analisa data yang diperoleh, memberikan saran untuk penelitian dengan tahap selanjutnya.

3.3 Diagram Blok Sistem

Sebagai panduan untuk melakukan pembuatan perangkat keras dari penelitian “Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah berbasis Arduino” maka dibuatlah sebuah blok diagram guna untuk mempermudah pemahaman terhadap konsep cara kerja sistem, yaitu seperti blok berikut ini :

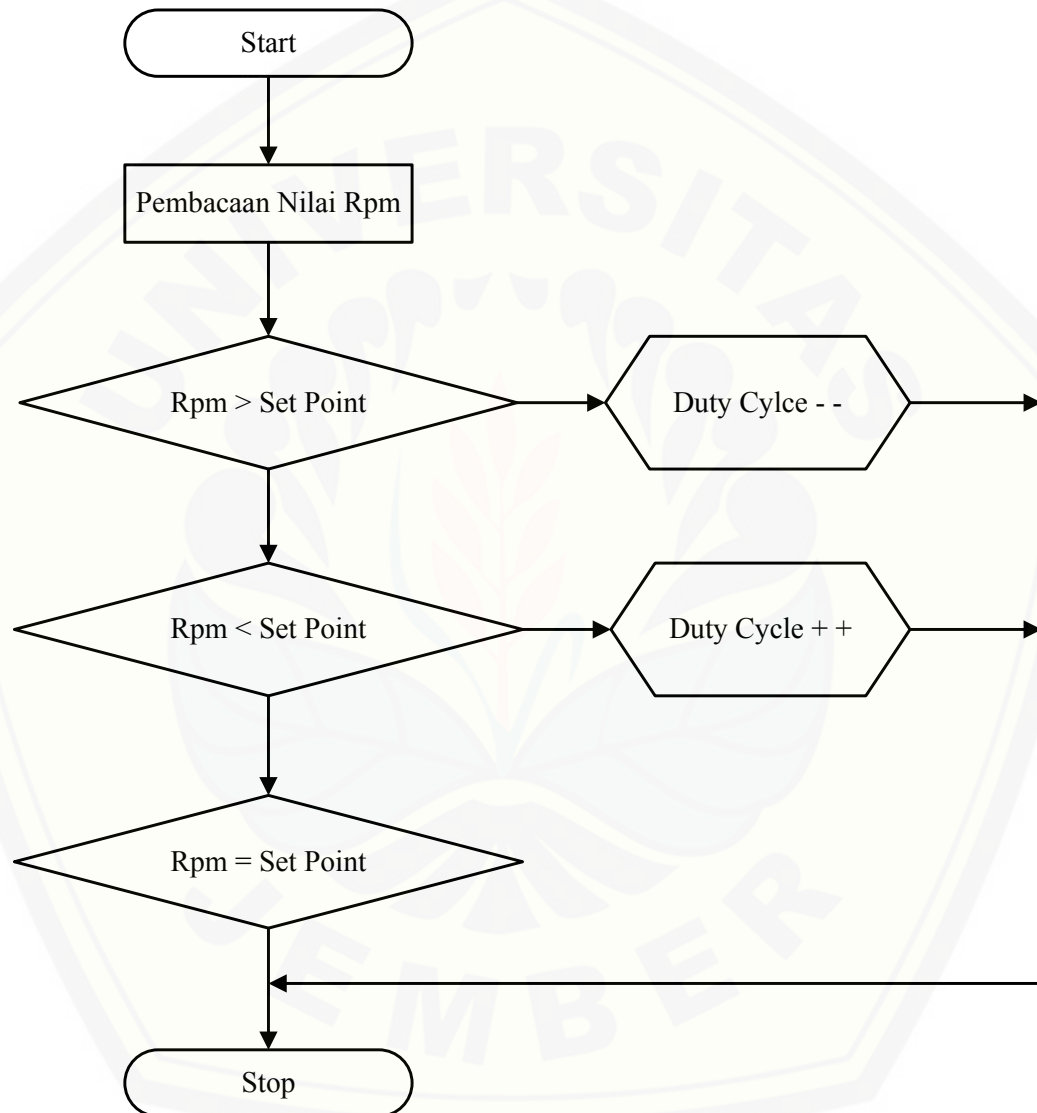


Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Dari blok diagram sistem seperti pada gambar 3.2 di atas dijelaskan bahwa sumber yang digunakan untuk mensuplai tegangan pada motor DC penguat terpisah pada kumparan medan yaitu dari sumber AC 220V yang diturunkan tegangannya menggunakan trafo *step down* dan kemudian disearahkan dengan *rectifier*. *Rectifier* digunakan sebagai masukan dari konverter DC-DC jenis *buck converter* dengan sifat menurunkan tegangan dengan mengatur nilai *duty cycle* dari mikrokontroler Arduino Uno. Tegangan keluaran dari *buck converter* dibaca oleh sensor tegangan dan digunakan untuk mensuplai kumparan medan pada motor DC penguat terpisah. Sedangkan pada rotor nantinya dipasang sensor kecepatan. Sensor kecepatan digunakan sebagai monitoring kecepatan motor dan sekaligus sebagai acuan umpan balik dari *set point* yang ditentukan. Untuk pengujian beban menggunakan lampu pijar dengan variasi 15, 25, 40, 50, dan 65 watt dimana motor akan dikopel dengan generator DC. Metode yang digunakan pada penelitian ini dengan *increment – decrement* untuk menjaga konstan

kecepatan motor sesuai *set point* ketika dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban.

3.3 Flowchart



Gambar 3.3 Flowchart Sistem PWM

Flowchart ini menjelaskan langkah-langkah kerja dari sistem suplai motor DC penguat terpisah dengan *buck converter*. Dalam sistem ini metode kontrol yang digunakan adalah *increment decrement*. Dimulai dari langkah awal yaitu pembacaan rpm motor DC dari sensor kecepatan. Setelah rpm motor sudah

terbaca oleh sensor dan data masuk ke mikrokontroler Arduino Uno maka selanjutnya akan diproses apakah pembacaan rpm dari sensor kecepatan tersebut sudah sesuai dengan set poin atau belum.

Dalam proses ini terdapat tiga kondisi. Pertama, jika rpm yang terbaca pada sensor lebih besar dari *set point* maka *duty cycle* akan dikurangi. Kedua, jika rpm yang terbaca pada sensor lebih kecil dari *set point* maka *duty cycle* akan ditambah. Dan yang ketiga, jika rpm yang terbaca pada sensor sama dengan *set point* maka *duty cycle* sama dengan tetap. Inti dari ketiga proses tersebut yaitu untuk menjaga agar kecepatan motor tetap konstan sesuai dengan set poin ketika dalam kondisi tanpa beban maupun berbeban. Dan proses tersebut akan berulang begitu seterusnya selama sistem masih bekerja.

3.4 Perancangan Sistem Mikrokontroler Arduino Uno

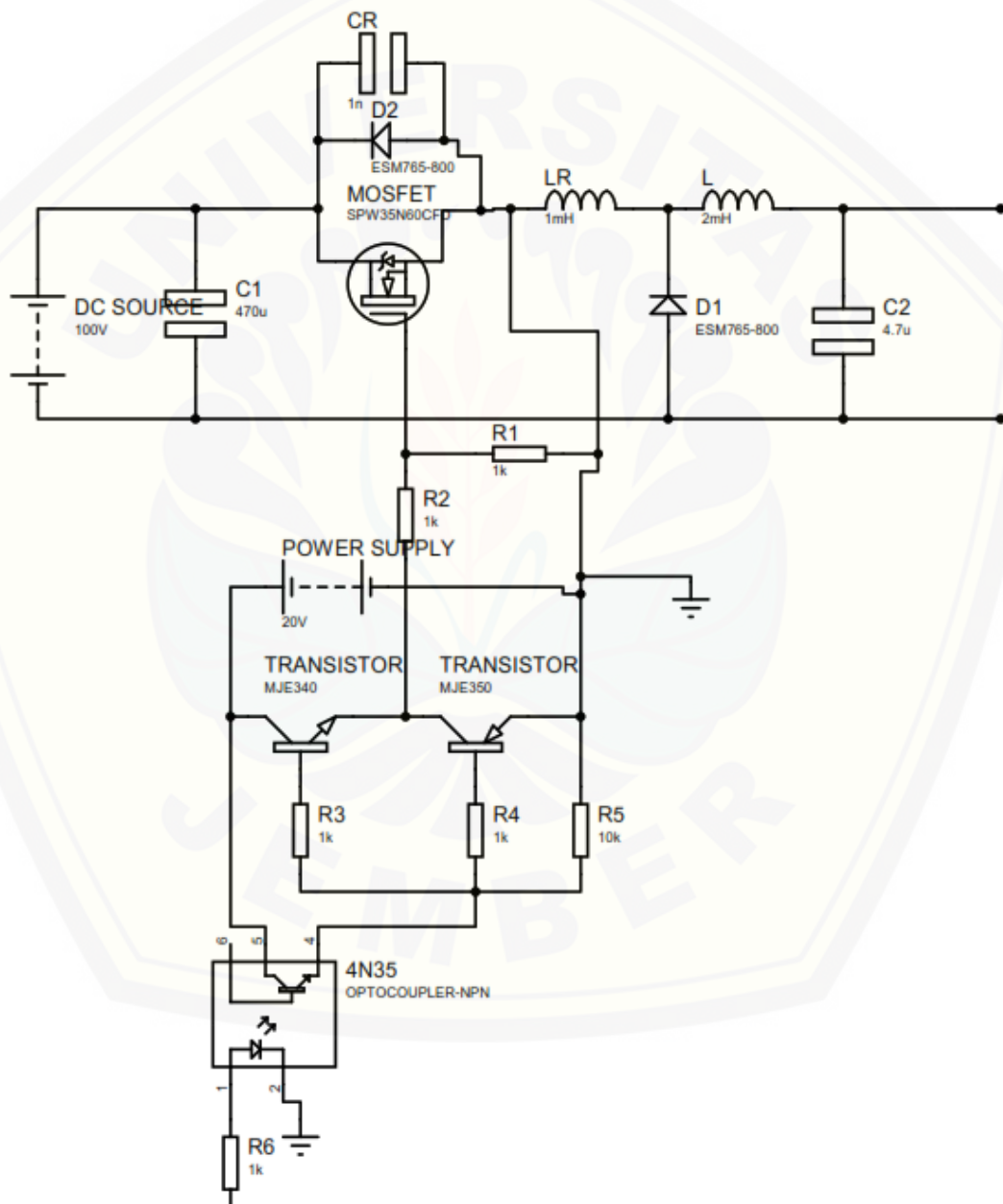
Sistem mikrokontroler yang digunakan dalam perancangan *embedded system* pada penelitian ini adalah arduino. Tipe arduino yang digunakan adalah arduino UNO. Untuk menerima sinyal *feedback* tegangan yang dikeluarkan oleh generator DC, dapat menggunakan fasilitas ADC yang terdapat pada pin A0 – A5. Pada penelitian ini digunakan pada fasilitas ADC pada pin A0. Untuk memberikan sinyal PWM pada *buck converter* dapat menggunakan pin – pin PWM pada arduino UNO R3, yaitu pada pin 3, 5, 6, 9 dan 10. Pada penelitian ini digunakan pin 9, karena menurut website resmi arduino frekuensi PWM yang dapat dihasilkan pada pin PWM ini adalah 31,250 Hz (Arduino LLC, 2015).

3.5 Perancangan *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching*

Pada penelitian ini digunakan sebuah konverter DC-DC jenis *buck converter* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC dan juga untuk mensuplai tegangan langsung pada kumparan medan pada motor DC penguat terpisah. *Buck converter* ini dirancang dengan menggunakan teknik pensaklaran *soft switching*. Teknik pensaklaran *soft switching* dikembangkan untuk meminimalkan rugi-rugi pensaklaran pada suatu rangkaian, salah satunya adalah

Zero Voltage Switching (ZVS). Pensaklaran saat tegangan nol (*ZVS*) diharapkan dapat dicapai dengan teknik quasi resonan.

Komponen MOSFET yang nantinya akan digunakan sebagai komponen pensaklaran *zero voltage switching*. Selain itu juga terdapat komponen lain seperti induktor, kapasitor, dioda, dan beban. Berikut adalah gambar rangkaian *buck converter* dengan *zero voltage switching*.



Gambar 3.4 Rangkaian *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching*

Untuk mendesain *buck converter* yang baik diperlukan perhitungan nilai komponen-komponen yang tepat. Karena nilai komponen yang tidak tepat, dapat menyebabkan hasil keluaran yang kurang baik, seperti keluarnya *ripple* tegangan dan arus yang terlalu besar. Untuk itu perlu ditetapkan beberapa variabel sebagai berikut.

- Frekuensi *switching* : 40 KHz
- Tegangan *output* : 90V – 20V
- Tegangan *input* : 100V
- Arus *output* : 2A
- *Ripple* arus : 10% dari arus *output*
- *Ripple* tegangan : 1% dari tegangan *output*

Dari data yang ditetapkan diatas, dapat dihitung nilai-nilai komponen yang digunakan, yaitu:

- Duty Cycle

$$D = \frac{V_0}{V_{s(max)}} \quad (3.1)$$

$$D = \frac{20}{100}$$

$$D = 0.2$$

- Nilai induktor

$$L = \left(\frac{1}{f}\right) \times (V_{s(max)} - V_0) \times \left(\frac{V_0 + V_f}{V_{s(max)} + V_f}\right) \times \left(\frac{1}{\Delta i_L}\right) \quad (3.2)$$

$$L = \left(\frac{1}{40 \times 10^3}\right) \times (100 - 20) \times \left(\frac{20+1}{100+1}\right) \times \left(\frac{1}{0.2}\right)$$

$$L = 2.08 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$L = 2.08 \text{ mH}$$

$$\text{Dimana : } \Delta i_L = 10\% \times i_{L(avg)} \quad (3.3)$$

$$\Delta i_L = 0.1 \times 2$$

$$\Delta i_L = 0.2 \text{ A}$$

$$\text{and } V_f = 1 \text{ V}$$

- Arus maksimum induktor

$$I_{max} = i_{L(avg)} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.4)$$

$$I_{max} = 2 + \frac{0.2}{2}$$

$$I_{max} = 2.67 + 0.267$$

$$I_{max} = 2.1 \text{ A}$$

- Kapasitansi output

$$C_o = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} = \frac{\Delta i_L \times T}{8\Delta V_o} = \frac{\Delta i_L}{8 \times f \times \Delta V_o} \quad (3.5)$$

$$C_o = \frac{0.2}{8 \times 40 \times 10^3 \times 0.2}$$

$$C_o = \frac{0.2}{8 \times 40 \times 10^3 \times 0.2}$$

$$C_o = 3.125 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$C_o = 3.125 \text{ } \mu\text{F}$$

$$\text{Dimana } \Delta V_o = \pm 1\% \times V_o = 0.01 \times V_o \quad (3.6)$$

$$\Delta V_o = 0.01 \times 20 = 0.2 \text{ V}$$

- Tegangan *ripple output*

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C_o} = \frac{\Delta i_L \times T}{8C_o} \quad (3.7)$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_L \times T}{8C_o} = \frac{\Delta i_L \times 1}{8C_o f}$$

$$\Delta V_o = \frac{0.2 \times 1}{8 \times 3.125 \times 10^{-6} \times 40 \times 10^3}$$

$$\Delta V_o = 0.2 \text{ V}$$

Dengan adanya perhitungan di atas maka dapat didesain komponen *buck converter* seperti pada tabel 3.1

Tabel 3.1. Komponen Hardware *Buck Converter*

Komponen	Nilai
MOSFET	SPW35N60CFD
<i>Diode</i>	ESM765-800
<i>Capacitor Output</i>	3,125 uF
<i>Capacitor Input</i>	470 uF
<i>Inductor</i>	2.08 mH
<i>Duty Cycle</i>	0,2
<i>Winding number of Inductor</i>	115
<i>Wire size of inductor</i>	0.7 mm
<i>Length of Wire</i>	4,6 m
<i>Snubber Capacitor</i>	1 nF
<i>Snubber Diode</i>	ESM765-800
<i>Resonant Inductor</i>	1 mH

3.6 Sensor Tegangan

Sensor tegangan dirancang dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan yang dirancang menggunakan resistor 200 k Ω dan resistor 4k7 Ω . Resistor yang digunakan dirangkai seri agar dapat membaca tegangan 0 – 200V dan perbandingan tegangan untuk di olah pada Arduino Uno 0 – 5 V. Perancangan dilakukan dengan melakukan perhitungan nilai resistor yang akan digunakan yang ditunjukkan pada persamaan 3.1.

Pada penelitian yang dilakukan penggunaan resistor 200 k Ω digantikan dengan merangkai seri resistor 100 k Ω karena resistor 200 k Ω sulit dicari di pasaran. Skema rangkaian sensor tegangan dapat dilihat pada gambar 3.5 di bawah ini.

$$V_{out} = \frac{V_{in} \times R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (3.1)$$

Dimana, $V_{out} = 5V$; $V_{in} = 200V$; $R_1 = 200\text{ k}\Omega$

$$5 = \frac{200 \times R_2}{(200k + R_2)}$$

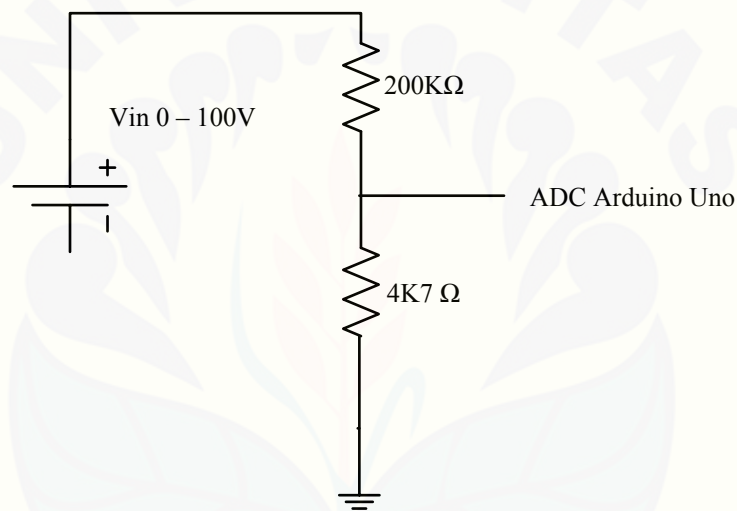
$$5 \times (200k + R_2) = 200 \times R_2$$

$$5 \times (200k + R_2) = 200 \times R_2$$

$$1000k + 5R_2 = 200R_2$$

$$R_2 = \frac{1000k}{205}$$

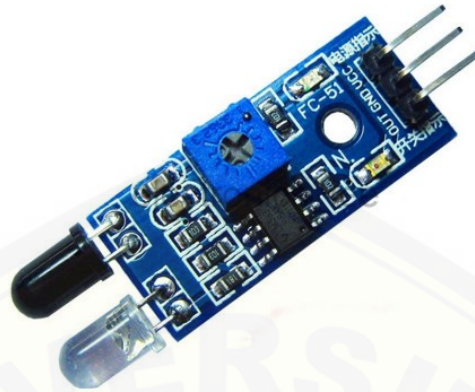
$$R_2 = 4k7\ \Omega$$



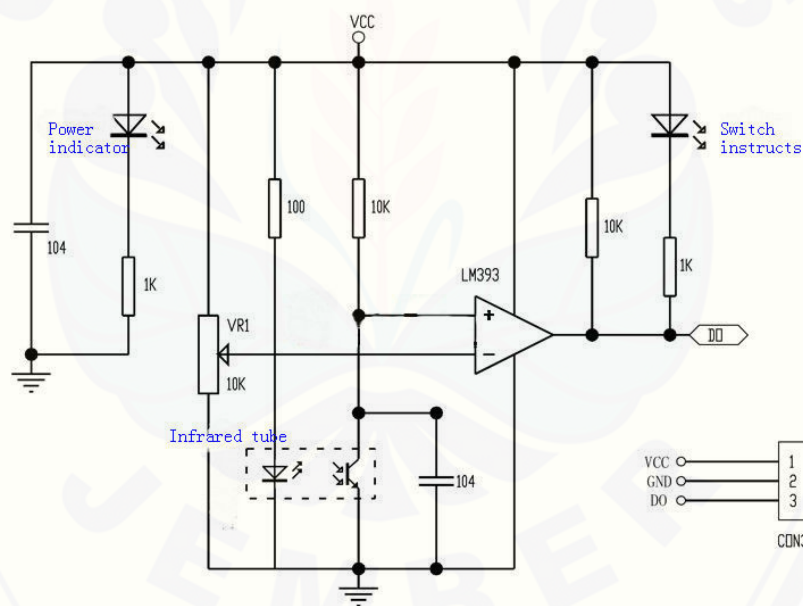
Gambar 3.5 Rangkaian Sensor Tegangan

3.7 Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan yang digunakan adalah IR Obstacle Avoidance, merupakan sensor yang menggunakan prinsip pantulan cahaya *infrared* sebagai penentu nilainya. Ketika modul sensor mendeteksi sebuah halangan atau objek di depan sensor maka akan diperoleh pantulan cahaya dengan intensitas yang diatur sensitivitasnya dengan sebuah potensiometer. Nilai yang dihasilkan adalah *high* atau *low*, yang kemudian bisa digunakan oleh MCU untuk melakukan kontrol terhadap device lain. Tegangan kerja pada sensor ini adalah 3V – 5V, menggunakan komparator LM393 yang stabil. Berikut gambar di bawah ini merupakan modul dan rangkaian sensor kecepatan tipe IR Obstacle Avoidance.



Gambar 3.6 Modul Sensor IR Obstacle Avoidance



Gambar 3.7 Rangkaian Sensor IR Obstacle Avoidance

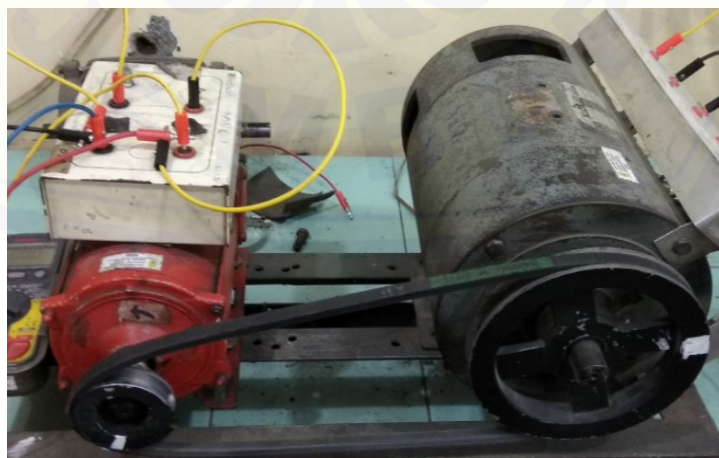
Komponen utamanya terdiri dari IR emitter dan IR receiver/phototransistor. Sensor ini bekerja ketika *power-up*, IR *emitter* akan memancarkan cahaya *infrared* yang kasat mata. Cahaya tersebut kemudian dipantulkan oleh objek yang ada di depannya. Cahaya terpantul ini kemudian diterima oleh IR *receiver*. Di dalam modul terdapat *Op-Amp* LM393 yang

berfungsi sebagai komparator antara resistansi IR *receiver* dan resistansi trimpot pengatur sensitivitas. Saat terkena cahaya *infrared* pantulan objek tadi, resistansi IR *receiver* akan mengecil sehingga *output Op-Amp* menjadi *high* (5V) dan menhidupkan LED sensor. *Output Op-Amp* ini juga terhubung dengan pin “OUT” yang dihubungkan ke Arduino Uno.

Warna object berpengaruh terhadap pantulan cahaya. Bila objek berwarna putih maka cahaya yang dipantulkan makin besar. Jika berwarna hitam, cahaya IR akan terserap. Ubah sensitivitas sensor dengan memutar trimpot pengatur sensitivitas sesuai keperluan.

3.8 Motor DC Penguat Terpisah

Motor DC yang digunakan adalah motor DC seri dengan daya 1 HP atau 0.75 KW. Motor ini nantinya akan digunakan sebagai penggerak mula (*prime mover*), kumparan medan pada motor ini akan disuplai oleh *buck converter*. Kemudian motor ini dikopel dengan generator DC untuk membangkitkan beban-beban yang bervariasi. Generator yang digunakan merupakan tipe *feedback* dengan nomer seri 63-120 yang mempunyai tegangan kerja sebesar 220 V dengan menghasilkan daya 250 Watt. Sistem kopel menggunakan *belt* dengan tipe B2340. Berikut gambar di bawah ini merupakan sistem dari motor DC penguat terpisah dan sistem pengkopelannya.



Gambar 3.8 Motor DC Penguat Terpisah

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari perencanaan dan pembuatan sistem kemudian dilakukan pengujian *software* dan *hardware* dengan beberapa analisa dan metode yang digunakan dalam penelitian “Rancang Bangun *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching* sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah Berbasis Arduino” dapat disimpulkan beberapa hal yaitu sebagai berikut.

1. *Buck converter (zvs)* sudah bekerja dengan baik dan dapat menyuplai motor DC penguat terpisah pada sisi kumparan medan hingga kecepatan nominal motor yaitu 1000 rpm.
2. *Buck converter (zvs)* dapat menghasilkan efisiensi sebesar 92,83% dan lebih baik dari *buck converter* konvensional yang hanya sebesar 83,49%.
3. Pada pengujian kedua *buck converter* dengan beban motor DC, torsi yang dihasilkan oleh motor relatif konstan berkisar 0,2 Nm.
4. Rata-rata presentase *error* sensor kecepatan sebesar 0,44% sehingga hasil pembacaan sensor tersebut cukup baik.
5. Pada pengujian integrasi secara *open loop* diketahui bahwa semakin besar beban yang diberikan maka semakin kecil kecepatan motor, namun untuk besar *duty cycle*, tegangan dan arus medan tetap konstan.
6. Pada pengujian integrasi *close loop* diketahui bahwa kecepatan putaran motor yang mendekati set point 800 rpm adalah ketika diberi beban sebesar 40 watt dengan kecepatan putaran sebesar 798 rpm.
7. Pada pengujian integrasi *close loop*, sistem kontrol *increment – decreament* (otomatis) dapat bekerja dengan baik dan dapat menjaga kestabilan laju motor saat kondisi berbeban mendekati set point dengan menaikkan atau menurunkan *duty cycle* dengan rata-rata presentase *error* sebesar 0,85%.
8. Pada pengujian integrasi secara *close loop* terjadi osilasi pembacaan rpm motor karena dipengaruhi perubahan *duty cycle* ketika motor diberi beban yang bervariasi.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian, penulis memberikan saran untuk mengembangkan penelitian ini karena dalam pengerjaannya tidak lepas dari berbagai macam kelemahan, baik itu pada perencanaan sistem maupun pada peralatan yang telah dibuat. Untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan serta sebagai masukan untuk perbaikan sistem menjadi lebih sempurna agar dapat dikembangkan untuk kedepannya maka diberikan beberapa saran dan harapan sebagai berikut.

1. Kontrol dapat ditambahkan menggunakan metode *fuzzy logic*. PID, PI, PD, ANFIS, dan NN.
2. *Buck converter* dapat diganti menggunakan *boost converter* atau *buck-boost converter*.
3. Sistem pengkopelan dapat diganti dengan generator AC 1 fasa maupun 3 fasa, atau generator dengan jenis penguatan lainnya seperti *shunt*, *series* atau *compound*.
4. Jika menginginkan pembacaan rpm yang lebih akurat sebaiknya menggunakan sensor kecepatan yang lebih bagus seperti sensor kecepatan yang menggunakan sistem laser yang tidak ketergantungan pada pancaran cahaya *infrared*.
5. *Buck converter* dapat dirancang dengan metode *soft switching* lainnya seperti *zero current switching*.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif Budi Setiawan, M. 2015. *Rancang Bangun Buck Converter sebagai Supply Motor DC Penguat Terpisah Berbasis Mikrokontroler*. Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- Decy Nataliana, M.T., Hari Wahyudi, M.T., Perdi Rusdiansyah, S.T., Perancangan dan Implementasi Pengendalian Kecepatan Motor DC Penguat Terpisah Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler ATMEGA 8535, Jurnal ITENAS, Hal 5 – 9, Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung, 2013.
- Fatimah. 2014. *Pangaturan Kecepatan Motor DC dengan menggunakan Metode Logika Fuzzy berbasis Mikrokontroller*. Surabaya: Jurusan Elektro Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- Renaldo Marsal., Mochammad Facta., Karnoto. 2014. *Perancangan Dc-Dc Converter buck Quasi Resonant Dengan Mode Pensaklaran Zero Current Switching (Zcs) Dan Zero Voltage Switching (Zvs)*. Semarang: Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
- Chapman, S. J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals*. New York: Library of Congress Cataloging.
- Suresh Kumar, A., Krishna Reddy, P. 2014. *Design & Implementation of Zero Voltage Switching Buck Converter*. Nandyal: *Int. Journal of Engineering Research and Applications*.
- Tri Heri Admojo. 2009. *Pengaturan Kecepatan Motor Dc Penguat Terpisah Menggunakan Kontrol Pid-Fuzzy (Perangkat Keras)*. Surabaya: Jurusan Elektro Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- Yingqi Zhang., Sen, P. N. 2003. *A New Soft Switching Technique for Buck, Boost and Buck-Boost Converters*. Canada: Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. LISTING PROGRAM ARDUINO UNO

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 7, 6, 4, 3, 2);
#include <FreqCount.h>
const int hallPin=5;
const unsigned long sampleTime=1000;
const int maxRPM = 10200;
#include <Wire.h>
byte Data[4];

int nilai=0;
const int NilaiPWM =9;
int mVperAmp=66;
int teganganSensorArus=0;
int sensorTeganganInput=0;
int sensorTeganganOutput=0;
int ACSoffset=2.5;
double Voltage=0;
double Amps=0;

const int up =13;
const int ok =12;
const int down =11;
int outputValue = 0;
//int buttonPushCounter = 0;
int buttonState = 0;
int buttonState1 = 0;
int lastButtonState = 0;

void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  // TCCR1B = _BV(CS02);
  TCCR1B = TCCR1B & B11110000| B00000001 ; //Pin 9, Frekuensi=32 Khz
  pinMode(NilaiPWM , OUTPUT);
  pinMode(up, INPUT);
  pinMode(down, INPUT);
  pinMode(ok, INPUT);
  pinMode(hallPin,INPUT);
  lcd.begin(16, 2);
```

```
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("/J-Creator*CODE/");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("/ALL IZ WELL/");
delay(700);
lcd.clear();

//FreqCount.begin(1000);
}

void loop() {

  Wire.requestFrom(8, 4);      // request 2 bytes from slave device #8
  while (Wire.available()) {  //check if data is available
    for(byte i = 0; i < 4; i++){
      Data [i] = Wire.read();  // it assigne the data to the array
      Serial.print(Data[i]);  // print the array
      Serial.print('\t');
    }
  }

  int rpm=getRPM();
  displayRPM(rpm);
  displayArus();
  displayTegangan();
  displaySET();
  delay(500);
}

void displayRPM(int rpm)
{
  //lcd.clear();
  lcd.setCursor(4,1);
  lcd.print(rpm);
  lcd.print("      ");
}

int getRPM()
{
  // sample for sampleTime in millisecs
```

```
int kount=0;
boolean kflag=LOW;
unsigned long currentTime=0;
unsigned long startTime=millis();
while (currentTime<=sampleTime)
{
  if (digitalRead(hallPin)==HIGH)
  {
    kflag=HIGH;
  }
  if (digitalRead(hallPin)==LOW && kflag==HIGH)
  {
    kount++;
    kflag=LOW;
  }
  currentTime=millis()-startTime;
}
int kount2rpm = int(60000./float(sampleTime))*kount;
return kount2rpm;
}

void displaySET()
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("SET:");
  lcd.setCursor(4,0);
  lcd.print(nilai);
  outputValue = map(nilai, 0, 100, 0, 255);
  analogWrite (NilaiPWM,outputValue);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(outputValue);
  lcd.print(" ");
}

buttonState = digitalRead(up);
if (buttonState != lastButtonState) {
  if (buttonState == HIGH) {
    nilai=nilai+1;
    if (nilai>100)
    {
      nilai=100;
    }

    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print(nilai);
    lcd.print(" ");
    delay(10);
  }
}
```

```
}
else {
}
//delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;
buttonState = digitalRead(down);
if (buttonState != lastButtonState) {
if (buttonState == HIGH) {
    nilai=nilai-1;
    if (nilai<0)
    {
        nilai=0;
    }
    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print(nilai);
    lcd.print(" ");
    delay(10);
}
else {
}
//delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;
buttonState = digitalRead(ok);
if (buttonState != lastButtonState) {
if (buttonState == HIGH) {
    nilai=0;
    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print(nilai);
    lcd.print(" ");
    delay(10);
}
else {
}
//delay(50);
}
lastButtonState = buttonState;

}

void displayTegangan()
{

int dataArus = Data[1];
int dataTegangan1 = Data[0];
```

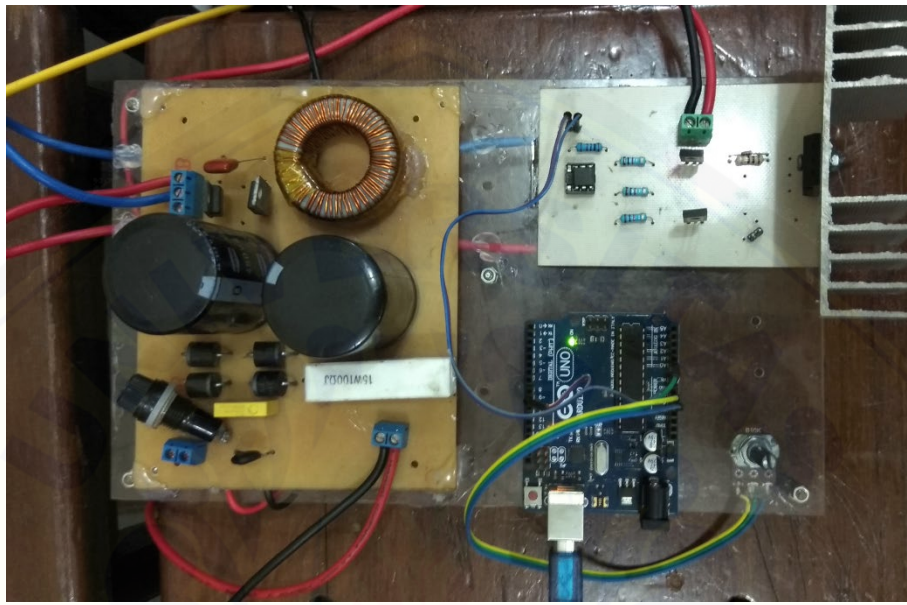
```
int data3 = Data[2];
int dataTegangan2 = Data[3];

float TeganganIn =(((float)dataTegangan1* 1.388)- 224.2);//y = 1,388x - 224,2

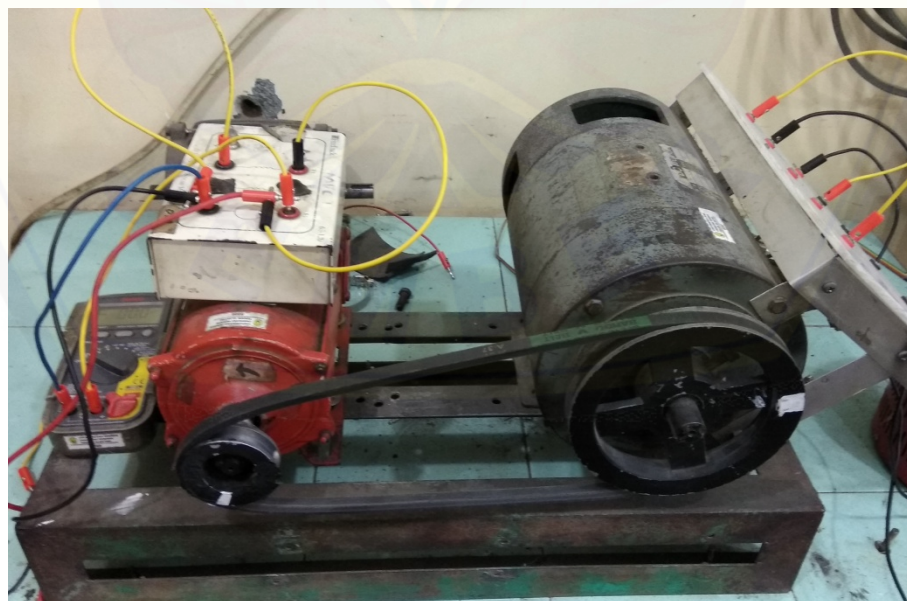
lcd.setCursor(12,0);
//lcd.print(dataTegangan1);
lcd.print(TeganganIn);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print("V:");
}
void displayArus()
{
  unsigned int x=0;
  float acsvalue=0.0,samples=0.0,avgacs=0.0,acsvaluef=0.0;
  for (int x=0;x<150;x++)
  {
    acsvalue=analogRead(A3);
    samples=samples+acsvalue;
    delay(3);
  }
  avgacs=samples/150.0;
  acsvaluef=(2.5-(avgacs*(5.0/1024)))/0.100;
  lcd.setCursor(12,1);
  lcd.print(acsvaluef);
  lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(10,1);
  lcd.print("I:");
}
```

LAMPIRAN B. GAMBAR *HARDWARE*

B.1 Buck Converter



B.2 Motor DC Penguat Terpisah



B.3 Beban Lampu Pijar



B.4 Keseluruhan Sistem



LAMPIRAN C. PERHITUNGAN EFISIENSI *BUCK CONVERTER***C.1 Efisiensi *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching***

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Dimana, η = efisiensi *buck converter*

P_{out} = daya output (watt)

P_{in} = daya input (watt)

$$D = 10\%, \quad \eta = \frac{1,61}{8} \times 100\%$$

$$\eta = 29,44\%$$

$$D = 20\%, \quad \eta = \frac{3,26}{14} \times 100\%$$

$$\eta = 35,22\%$$

$$D = 30\%, \quad \eta = \frac{4,90}{18} \times 100\%$$

$$\eta = 36,10\%$$

$$D = 40\%, \quad \eta = \frac{7,72}{22} \times 100\%$$

$$\eta = 38,38\%$$

$$D = 50\%, \quad \eta = \frac{10,99}{25} \times 100\%$$

$$\eta = 43,98\%$$

$$D = 60\%, \quad \eta = \frac{15,59}{28} \times 100\%$$

$$\eta = 55,68\%$$

$$D = 70\%, \quad \eta = \frac{18,00}{28} \times 100\%$$

$$\eta = 64,28\%$$

$$D = 80\%, \quad \eta = \frac{21,27}{29} \times 100\%$$

$$\eta = 73,33\%$$

$$D = 90\%, \quad \eta = \frac{26,08}{31} \times 100\%$$

$$\eta = 84,11\%$$

$$D = 100\%, \quad \eta = \frac{36,98}{39} \times 100\%$$

$$\eta = 92,83\%$$

C.2 Efisiensi *Buck Converter* Konvensional

$$D = 10\%, \quad \eta = \frac{1,28}{9} \times 100\%$$

$$\eta = 14,25\%$$

$$D = 20\%, \quad \eta = \frac{3,60}{11} \times 100\%$$

$$\eta = 32,80\%$$

$$D = 30\%, \quad \eta = \frac{5,36}{17} \times 100\%$$

$$\eta = 31,56\%$$

$$D = 40\%, \quad \eta = \frac{9,02}{21} \times 100\%$$

$$\eta = 42,94\%$$

$$D = 50\%, \quad \eta = \frac{11,86}{25} \times 100\%$$

$$\eta = 47,45\%$$

$$D = 60\%, \quad \eta = \frac{15,60}{25} \times 100\%$$

$$\eta = 62,39\%$$

$$D = 70\%, \quad \eta = \frac{17,37}{27} \times 100\%$$

$$\eta = 64,32\%$$

$$D = 80\%, \quad \eta = \frac{19,55}{28} \times 100\%$$

$$\eta = 69,83\%$$

$$D = 90\%, \quad \eta = \frac{22,23}{30} \times 100\%$$

$$\eta = 74,10\%$$

$$D = 100\%, \quad \eta = \frac{25,88}{31} \times 100\%$$

$$\eta = 83,49\%$$

LAMPIRAN D. PERHITUNGAN TORSI MOTOR DC PENGUAT TERPISAH

D.1 Perhitungan Torsi Motor DC Pada Pengujian *Buck Converter* dengan *Zero Voltage Switching*

$$T = \frac{P}{\omega}$$

Dimana,

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

Keterangan T = Torsi motor DC (Nm)

P = Daya motor DC (watt)

ω = Kecepatan sudut (rpm)

N = Kecepatan motor (rpm)

$\pi = 3,14$

$$D = 10\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 0}{60}$$

$$\omega = 0 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{1,61}{0}$$

$$T = 0 \text{ Nm}$$

$$D = 20\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 110}{60}$$

$$\omega = 11,51 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{3,26}{11,51}$$

$$T = 0,28 \text{ Nm}$$

$$D = 30\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 216}{60}$$

$$\omega = 22,61 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{4,90}{22,61}$$

$$T = 0,21 \text{ Nm}$$

$$D = 40\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 354}{60}$$

$$\omega = 37,07 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{7,72}{37,07}$$

$$T = 0,20 \text{ Nm}$$

$$D = 50\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 491}{60}$$

$$\omega = 51,41 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{10,99}{51,41}$$

$$T = 0,21 \text{ Nm}$$

$$D = 60\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 707}{60}$$

$$\omega = 74,03 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{15,59}{74,03}$$

$$T = 0,21 \text{ Nm}$$

$$D = 70\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 736}{60}$$

$$\omega = 77,07 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{18,00}{77,07}$$

$$T = 0,23 \text{ Nm}$$

$$D = 80\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 827}{60}$$

$$\omega = 86,60 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{21,27}{86,60}$$

$$T = 0,24 \text{ Nm}$$

$$D = 90\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 928}{60}$$

$$\omega = 97,17 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{26,08}{97,17}$$

$$T = 0,27 \text{ Nm}$$

$$D = 100\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 1024}{60}$$

$$\omega = 107,23 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{36,98}{107,23}$$

$$T = 0,34 \text{ Nm}$$

D.2 Perhitungan Torsi Motor DC Pada Pengujian *Buck Converter* Konvensional

$$D = 10\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 0}{60}$$

$$\omega = 0 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{1,28}{0}$$

$$T = 0 \text{ Nm}$$

$$D = 20\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 132}{60}$$

$$\omega = 13,82 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{3,60}{13,82}$$

$$T = 0,26 \text{ Nm}$$

$$D = 30\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 295}{60}$$

$$\omega = 30,89 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{5,36}{30,89}$$

$$T = 0,17 \text{ Nm}$$

$$D = 40\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 481}{60}$$

$$\omega = 50,37 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{9,02}{50,37}$$

$$T = 0,17 \text{ Nm}$$

$$D = 50\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 593}{60}$$

$$\omega = 60,09 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{11,86}{60,09}$$

$$T = 0,19 \text{ Nm}$$

$$D = 60\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 687}{60}$$

$$\omega = 71,94 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{15,60}{71,94}$$

$$T = 0,21 \text{ Nm}$$

$$D = 70\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 754}{60}$$

$$\omega = 78,95 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{17,37}{78,95}$$

$$T = 0,22 \text{ Nm}$$

$$D = 80\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 782}{60}$$

$$\omega = 81,89 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{19,55}{81,89}$$

$$T = 0,23 \text{ Nm}$$

$$D = 90\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 855}{60}$$

$$\omega = 89,53 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{22,23}{89,53}$$

$$T = 0,24 \text{ Nm}$$

$$D = 100\%, \quad \omega = \frac{2\pi \times 920}{60}$$

$$\omega = 96,34 \text{ rpm}$$

$$T = \frac{25,88}{96,34}$$

$$T = 0,26 \text{ Nm}$$