

**RANCANG BANGUN CURRENT LIMITER PADA BUCK  
CONVERTER DENGAN MENGGUNAKAN PENGENDALI PID**

**SKRIPSI**

untuk memenuhi salah satu persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S1



**Disusun oleh:**

**Akhid Sulthoni**

**14524061**

**Jurusan Teknik Elektro**

**Fakultas Teknologi Industri**

**Universitas Islam Indonesia**

**Yogyakarta**

**2020**

# LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

RANCANG BANGUN CURRENT LIMITER PADA BUCK CONVERTER DENGAN  
MENGUNAKAN PENGENDALI PID

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh:

  
Akhid Sulthoni  
14524061

Yogyakarta, 30 November 2020

Menyetujui,

Pembimbing



Sisdarmanto Adinandra, S.T., M.Sc., Ph.D.  
025240101

# LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

RANCANG BANGUN CURRENT LIMITER PADA BUCK CONVERTER DENGAN

MENGGUNAKAN PENGENDALI PID

SKRIPSI

Oleh:

Nama : Akhid Sulthoni

No. Mahasiswa : 14524061

Telah Dipertahankan di Depan Sidang Penguji Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Konsentrasi Kendali Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 31 Desember 2020

Tim Penguji,

Sisdarmanto Adinandra, Ph.D.  
Ketua Penguji

Husein Mubarak, S.T., M.Eng.  
Penguji 1

Medilla Kusriyanto, S.T., M.Eng.  
Penguji 2

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Universitas Islam Indonesia



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

## PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 30 November 2020



(Akhid Sulthoni)

14524061

## KATA PENGANTAR



*Assalamu'alaikum Wr.Wb*

Puji syukur penyusun panjatkan atas kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.

Sholawat beserta salam senantiasa penyusun haturkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW yang telah membimbing umat dari zaman kegelapan menuju zaman yang sesuai dengan ketentuan Allah SWT. Selama pelaksanaan tugas akhir penyusun banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu dengan kerendahan hati, penyusun ingin berterima kasih kepada :

1. Almarhum Ayahanda tercinta yang telah berjuang untuk membiayai dan mendukung penuh segala kebutuhan kuliah hingga detik ini meski telah tiada. Mamah tersayang yang selalu memberikan dukungan moral dan mental untuk selalu semangat menyelesaikan skripsi.
2. Segenap keluarga besar, Adek, Pipah, terutama Bude dan Pakde yang selalu ingat dan selalu mengingatkan dan mendukung dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Sisdarmanto Adinandra selaku dosen pembimbing yang telah dan selalu menerima saya sebagai mahasiswa bimbingan skripsi dengan segala kekurangan dan kekhilafan yang selalu saya lakukan.
4. M.Fanriadho, M.Zharfan W., Fahmi Lukis yang telah berbaik hati memberikan ilmu dan meluangkan banyak waktunya untuk membantu proses pengerjaan tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan.
5. Konco Kenthel, Mohd Brado Frasetyo dan Hizrian Rajiv Sadewa yang sudah membantu dalam proses penulisan skripsi, Hasyim Abdulloh yang memfasilitasi peralatan penunjang penelitian ini dan Mayong N. Savero yang menemani mabar saat stress skripsian.
6. Sylendra Power sebagai perusahaan yang telah menerima saya, mempercayakan saya yang masih berstatus mahasiswa, memberikan banyak toleransi dan memfasilitasi penelitian ini hingga akhirnya penelitian ini dapat terselesaikan.
7. Dan banyak pihak lainnya yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam proses pengerjaan tugas akhir ini hingga terselesaikan.

Saya menyadari sepenuhnya bahwa dalam pelaksanaan tugas akhir ini banyak kekeliruan dan kekurangan sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun serta penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga hasil dari tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan di masa yang akan datang, Amin.

Yogyakarta, 30 November 2020



(Akhid Sulthoni)

14524061



## ABSTRAK

Penggunaan perangkat elektronik yang meningkat berbanding lurus dengan penggunaan perangkat konverter, suatu hal yang harus diperhatikan adalah beberapa konverter memiliki resiko tinggi pada aspek keselamatan pada alat maupun pengguna, yaitu apabila terdapat ketidakseimbangan antara daya masukan dengan beban listrik yang disuplai. Sehingga dibutuhkan sistem *current limiter* sebagai proteksi arus berlebih. Pada penelitian ini telah dirancang *Buck Converter* dengan *current limiter* sebagai pembatas arus berlebih dengan menggunakan sensor ACS712, dengan metode tersebut akan didapat arus yang akan digunakan sebagai umpan balik pada pengendali PID sebagai acuan pengendali arus. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *current limiter* dengan pengendali PID yang dirancang mampu membatasi arus berlebih ketika daya masukan *buck converter* berubah-ubah dengan efisiensi konversi rata-rata sebesar 81%.

Kata Kunci : *Buck Converter*, *Current Limiter*, Pengendali PID, Sensor Arus, ACS712



# DAFTAR ISI

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI .....	iii
PERNYATAAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Studi Literatur .....	3
2.2 Tinjauan Teori .....	4
2.2.1 Sensor Arus .....	4
2.2.2 Pengendali PID .....	4
2.2.3 Buck Converter .....	5
BAB 3 METODOLOGI .....	7
3.1 Alur Penelitian .....	7
3.2 Perancangan dan Perakitan Alat .....	7
3.2.1 <i>Current Limiter</i> .....	7

3.2.2 Buck Converter .....	9
3.3 Perancangan Perangkat Lunak.....	11
3.4 Validasi Sensor Arus .....	12
3.5 Pengujian Kalang Terbuka.....	13
3.6 Pengambilan Data .....	13
3.7 Analisis Data dan Penutup.....	13
<b>BAB 4 Hasil dan Pembahasan .....</b>	<b>14</b>
4.1 Hasil Perakitan Alat.....	14
4.2 Validasi Sensor Arus .....	14
4.3 Pengujian Kalang Terbuka.....	16
4.4 Pengujian Kalang Tertutup .....	17
4.4.1 Membuat Pengendali PID .....	17
4.4.2 Validasi Pengendali PID .....	21
4.4.3 Pengujian Sistem <i>Current Limiter</i> .....	23
4.5 Hasil dan Analisa.....	25
<b>BAB 5 KESIMPULAN &amp; SARAN .....</b>	<b>28</b>
5.1 KESIMPULAN.....	28
5.2 SARAN.....	28
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>29</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pinout Sensor Arus ACS712 .....	4
Gambar 2.2 <i>Schematic Buck Converter</i> .....	5
Gambar 3.1 Blok Diagram <i>Current Limiter</i> .....	8
Gambar 3.2 Arduino Nano .....	8
Gambar 3.3 <i>Schematic Current Limiter</i> .....	8
Gambar 3.4 Desain Layout dan 3D <i>Current Limiter</i> .....	9
Gambar 3.5 Skema <i>Buck Converter</i> dengan komponen pendukung.....	10
Gambar 3.6 Desain 3D <i>Buck Converter</i> .....	11
Gambar 3.7 Alur Diagram Pengendalian .....	12
Gambar 3.8 Diagram Validasi.....	12
Gambar 3.9 Diagram Pengujian <i>Buck Converter</i> .....	13
Gambar 4.1 Hasil Perakitan <i>Current Limiter</i> .....	14
Gambar 4.2 Hasil Perakitan <i>Buck Converter</i> .....	14
Gambar 4.3 DC Power Supply RIGOL831 .....	15
Gambar 4.4 Beban Statis .....	15
Gambar 4.5 Blok Diagram Kalang Tertutup .....	17
Gambar 4.6 Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 1 .....	18
Gambar 4.7 Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 2 .....	18
Gambar 4.8 Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 3 .....	19
Gambar 4.9 Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 4 .....	19
Gambar 4.10 Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 5 .....	20
Gambar 4.11 Grafik Validasi 2A .....	21
Gambar 4.12 Grafik Validasi 3A .....	21
Gambar 4.13 Grafik Validasi 4A .....	22
Gambar 4.14 Grafik Validasi 5A .....	22

Gambar 4.15 Validasi 5A Dengan Batas Tertinggi 125 PWM.....	22
Gambar 4.16 Data Tegangan, Arus dan Daya Masukan .....	23
Gambar 4.17 Data Tegangan (a) dan Arus (b) Keluaran .....	24
Gambar 4.18 Data Tegangan, Arus dan Daya Masukan .....	25
Gambar 4.19 Data Tegangan (a) dan Arus (b) Keluaran .....	25
Gambar 4.20 Grafik Hasil Pengujian <i>Current Limiter</i> 1 (a) dan 2 (b).....	26



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Datasheet Spesifikasi Sensitivitas Sensor Arus ACS712.....	4
Tabel 4.1 Tabel Pengujian Validasi Sensor ACS712.....	16
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kalang Terbuka .....	16
Tabel 4.3 Parameter Pengendali PID .....	18
Tabel 4.4 Data Respon <i>Buck Converter</i> Pada Percobaan 5.....	20
Tabel 4.5 Tabel Hasil Percobaan 5.....	21
Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Untuk Mencari Daya Minimum <i>Buck Converter</i> .....	24
Tabel 4.7 Data Hasil Pengujian Dengan Tegangan dan Arus Masukan Berbeda.....	25
Tabel 4.8 Parameter Daya Terukur Pada Pengujian <i>Current Limiter 1</i> .....	26
Tabel 4.9 Parameter Terukur Pengendali Pada Pengujian <i>Current Limiter 1</i> .....	26
Tabel 4.10 Parameter Daya Terukur Pada Pengujian <i>Current Limiter 2</i> .....	26
Tabel 4.11 Parameter Terukur Pengendali Pada Pengujian <i>Current Limiter 2</i> .....	27

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Energi terbarukan merupakan energi yang berasal dari proses sirkulasi alam yang berkelanjutan, seperti tenaga surya dan tenaga angin [1]. Dimulai sejak tahun 2012 sampai 2040 konsumsi energi terbarukan diprediksi akan meningkat dengan rata-rata 2.9% per-tahun. Sehingga, pada tahun 2040 jumlah pembangkit listrik dengan energi terbarukan diperkirakan akan sama banyaknya dengan pembangkit listrik tenaga fosil [2].

Meningkatnya penggunaan energi terbarukan berbanding lurus dengan penggunaan *power electronics converters* (PEC) dalam aplikasi sistem tenaga listrik [3]. PEC memiliki beberapa topologi salah satunya yaitu DC/DC *buck converter* yang berfungsi untuk mengkonversikan energi yang dihasilkan dari sumber energi terbarukan sebelum menuju ke media penyimpanan energi seperti baterai. Besarnya energi listrik yang dihasilkan energi terbarukan sangat bergantung pada kondisi alam, seperti intensitas cahaya yang ditangkap *solar cell*. Oleh karena itu, energi listrik yang dihasilkan cenderung fluktuatif dan tidak stabil. Berdasarkan kondisi seperti ini apabila terdapat perangkat yang terhubung ke sistem melalui *buck converter* maka akan mengalami arus berlebih atau *overcurrent*. *Overcurrent* umumnya terjadi karena suplai energi pada sistem tidak memiliki sistem pengendalian, sehingga tidak ada tindakan pencegahan apabila terjadi *overcurrent*. [4].

Penelitian ini bertujuan untuk membuat sebuah *current limiter* pada *buck converter* yang dapat mencegah terjadinya *overcurrent*. Algoritma kendali yang digunakan adalah pengendali PID yang memiliki karakteristik yang sederhana dan akurat. Cara kerja sistem pengendali PID adalah mengkompensasi nilai deviasi antara *set point* dengan nilai parameter yang terukur dengan cara menambahkan *gain proportional*, *integral* dan *derrivative*. Sehingga, dengan menggunakan kendali tersebut maka keluaran arus pada *buck converter* akan selalu dimonitor dan dikendalikan agar sesuai dengan target arus yang diinginkan. Selanjutnya, aktuator yang melaksanakan perintah sinyal kendali dari PID adalah saklar elektronika. Komponen elektronika yang digunakan untuk proses pensaklaran adalah MOSFET yang memiliki efisiensi yang baik. Dengan proses pengendalian arus tersebut maka diharapkan arus berlebih yang keluar dari *buck converter* akan teratasi [5]. Sistem *current limiter* yang dirancang memiliki fleksibilitas dalam menentukan spesifikasi batas tertinggi arus yang ingin dikendalikan, berbeda dengan sistem proteksi yang tersedia di pasaran dimana nilai limitasi arusnya sudah ditetapkan pada spesifikasi alat.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang sudah dijabarkan pada latar belakang, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana merancang *Current Limiter* sebagai sistem proteksi arus berlebih pada *Buck Converter* dengan menggunakan pengendali PID.

## 1.3 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah dalam menyelesaikan penelitian ini agar sesuai tujuan dan tidak memunculkan permasalahan yang terlalu kompleks. Diantaranya adalah :

1. *Buck converter* yang digunakan merupakan buatan sendiri dengan spesifikasi tegangan masukan sebesar 60V dan arus masukan sebesar 2A. Sedangkan tegangan keluar maksimal sebesar 15V dan arus keluar maksimal sebesar 4A.
2. *Current limiter* digunakan untuk membatasi dan mempertahankan nilai arus keluaran *buck converter* dimana beban yang digunakan merupakan *static load*.
3. Sensor yang digunakan sebagai *feedback* pada pengendali PID *current limiter* adalah ACS712.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan *current limiter* sebagai sistem proteksi arus berlebih pada *buck converter* dengan menggunakan pengendali PID.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang ingin dicapai adalah fungsi *current limiter* diharapkan dapat mengurangi resiko kerusakan sekaligus menjadi pengaman pada perangkat elektronika daya yang diakibatkan oleh arus berlebih sehingga dapat memperpanjang usia perangkat elektronika daya.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Studi Literatur

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang telah mengulas mengenai sistem *current limiter* pada *buck converter* dengan menggunakan pengendali PID. Adapun beberapa penelitian tersebut sebagai berikut:

Penelitian dilakukan oleh Pandey dkk, penelitian ini tentang bagaimana merancang sebuah sistem *buck converter* yang dapat dikendalikan dengan menggunakan pengendali PID. Metode yang dilakukan yakni dengan membuat model matematis dari converter lalu disimulasikan dengan menggunakan Matlab dan ditambahkan pengendali PID. Hasilnya adalah dengan penambahan PID maka sistem konversi dari *buck converter* memperoleh performa yang lebih baik dari sebelumnya [6].

Penelitian lain dilakukan oleh Singh dkk, penelitian ini tentang bagaimana merancang pengendali PI yang diterapkan pada *buck converter* untuk menjaga agar tegangannya konstan. Metode yang dilakukan sama seperti penelitian yang dilakukan oleh A. Pandey dkk, yaitu melakukan simulasi dengan menggunakan MATLAB. Target pengendalian ini adalah untuk menjaga agar tegangan yang dikeluarkan oleh *buck converter* stabil dengan cara merubah PWM pada input *buck converter*. Hasilnya adalah dengan menambahkan PID pada rancangan *buck converter* dan pengendali yang telah divalidasi maka didapatkan hasil converter dengan tingkat stabilitas dan efisiensi yang sangat tinggi [7].

Selanjutnya penelitian dari Luca dkk, mereka meneliti tentang bagaimana cara meningkatkan performa dari converter dengan mengembangkan model pengendali arus berbasis *model predictive control*. Cara kerja metode tersebut adalah model akan menghitung input arus paling optimal di setiap iterasi kendali dengan cara meminimalisir *cost function* dari *error* sehingga nilai arus selalu dalam keadaan *steady* apabila terjadi dinamika pada sistem. Hasil dari penelitian ini adalah metode yang digunakan dapat meningkatkan akurasi pengendali tanpa memerlukan perubahan arsitektur kendali serta mengurangi beban perhitungan pada sistem [8].

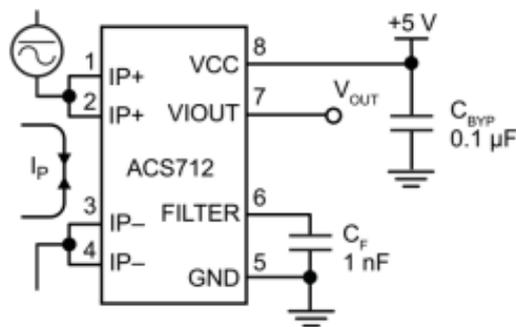
Pada penelitian ini, metode pengendali PID akan digunakan untuk meningkatkan sistem proteksi arus berlebih pada *buck converter* sehingga diharapkan arus yang masuk ke *converter* akan stabil dan aman apabila terjadi dinamika pada sistem.

## 2.2 Tinjauan Teori

### 2.2.1 Sensor Arus

ACS712 merupakan suatu IC terpaket yang berguna sebagai sensor arus menggantikan transformator arus yang relatif besar dalam hal ukuran. Pada prinsipnya ACS712 sama dengan sensor *hall effect* lainnya yaitu dengan memanfaatkan medan magnetik di sekitar arus kemudian dikonversi menjadi tegangan yang linear dengan perubahan arus [9].

Sensor arus ACS712 dapat mengukur arus positif dan negatif. Hal ini dikarenakan sensor mengeluarkan tegangan sebesar setengah dari tegangan referensi ketika tidak ada arus yang melewatinya. Dalam perhitungan arus juga dipengaruhi oleh tegangan referensi ADC dan juga berdasarkan resolusi dari ADC.



Gambar 2.1 Pinout Sensor Arus ACS712

Gambar 2.1 menunjukkan rangkaian konfigurasi pin pada IC ACS. Pin 1 dan 2 merupakan bagian yang dihubungkan dengan sumber sedangkan pin 3 dan 4 dihubungkan dengan beban yang ingin dihitung arusnya. Pin  $V_{out}$  merupakan pin yang nantinya dibaca oleh ADC berupa tegangan. Tegangan tersebut kemudian dikalikan dengan konstanta yang sudah tersedia dari spesifikasi ACS712 seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Datasheet Spesifikasi Sensitivitas Sensor Arus ACS712

Sensitivitas	Tipe 5T = 185mV/A
	Tipe 20T = 100mV/A
	Tipe 30T = 66mV/A

### 2.2.2 Pengendali PID

Pengendali PID (*Proportional, Integral and Derivative*) adalah salah satu algoritma kendali yang berfungsi untuk mengendalikan sebuah sistem [8]. Pengendali PID biasanya digunakan pada sebuah sistem kendali *feedback* seperti *process control* pada industri. Algoritma pengendali PID yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (2.2).

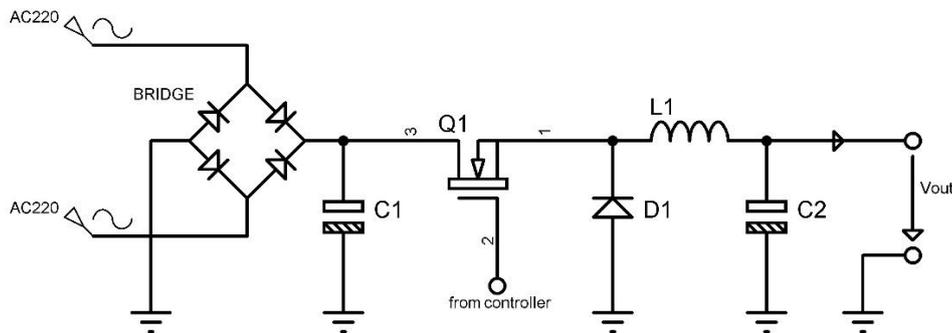
$$u(t) = P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

dimana:

- $K_p$  : Penguat Proportional
- $K_I$  : Penguat Integral
- $K_D$  : Penguat Derivative
- $e$  : error =  $Y_{sp} - Y_m$
- $Y_{sp}$  : Set Point
- $Y_m$  : Respon Aktual
- $t$  : Waktu
- $\tau$  : Variabel Integrasi (0 sampai  $t$ )

### 2.2.3 Buck Converter

*Buck Converter* merupakan salah satu jenis *switching converter* yang dapat menurunkan tegangan DC dari tingkat tegangan yang lebih tinggi kedalam tegangan DC dengan tingkat tegangan yang lebih rendah. *Buck Converter* memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penurun tegangan tipe *linier* yang mana tingkat efisiensinya dapat mencapai 90%. Hal ini dikarenakan fungsi MOSFET yang berperan sebagai *electronic switching* yang dapat dibuka (OFF) dan ditutup (ON) [10]. *Schematic Buck Converter* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Schematic Buck Converter

Menentukan komponen Dioda Bridge, MOSFET dan Dioda Recovery tidak memerlukan perhitungan, hanya perlu mempertimbangkan spesifikasi komponen berdasarkan *datasheet*

terhadap target spesifikasi *Buck Converter* yang dirancang. Namun, berbeda dengan kapasitor C1, C2 dan Induktor dimana penentuan komponennya harus berdasarkan perhitungan. Fungsi Induktor L1 pada *schematic* diatas adalah sebagai filter *ripple* arus. Persamaan untuk menghitung nilai L dapat dilihat pada persamaan (2.4).

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out})}{F_s \times \Delta I_l} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.4)$$

dimana:

- $L$  : nilai induktor
- $V_{in}$  : tegangan masukan
- $V_{out}$  : tegangan keluaran
- $F_s$  : frekuensi sampling (menggunakan 3,902.8Hz)
- $\Delta I_l$  : arus *ripple* yang diinginkan (30% dari arus keluaran)

Berdasarkan persamaan diatas maka dibutuhkan minimum induktor senilai 1.1mH pada *ripple* arus sebesar 30%. Jika ingin menurunkan *ripple* arus lebih rendah lagi maka dibutuhkan nilai induktor yang lebih besar. Hampir sama seperti Induktor, kapasitor C1 dan C2 berfungsi sebagai filter *ripple* tegangan dari input, namun kapasitor C2 lebih cenderung sebagai filter tegangan sebelum masuk ke beban. Persamaan untuk menghitung kapasitor C1 dapat dilihat pada persamaan (2.5)

$$C = \frac{I}{F \times V_r} \quad (2.5)$$

dimana:

- $C$  : nilai kapasitor
- $I$  : arus input
- $F$  : frekuensi
- $V_r$  : tegangan *ripple* yang diinginkan (20% dari tegangan input)

Berdasarkan persamaan diatas maka dibutuhkan minimum kapasitor C1 senilai 1000uF/400V pada *ripple* tegangan sebesar 20%. Jika ingin menurunkan *ripple* tegangan lebih rendah lagi maka dibutuhkan nilai kapasitor yang lebih besar.

## BAB 3

### METODOLOGI

#### 3.1 Alur Penelitian

Alur penelitian merupakan suatu tahapan atau gambaran yang akan dilakukan penulis guna memudahkan proses penelitian. Langkah awal penelitian yaitu mencari literatur yang digunakan untuk mengetahui dasar-dasar mengenai sistem *current limiter*, *buck converter*, sensor arus, pengendali PID dan program pendukung yang dibutuhkan pada penelitian ini.

Setelah didapatkan beberapa literatur sebagai pembandingan maka langkah selanjutnya adalah merancang perangkat keras yang akan digunakan. Perangkat keras ini berupa *current limiter* dan *buck converter*. Proses perancangan ini meliputi penentuan dan perhitungan komponen yang akan digunakan, desain skematik dan *layout*, lalu mengimplementasikan desain tersebut dalam bentuk alat.

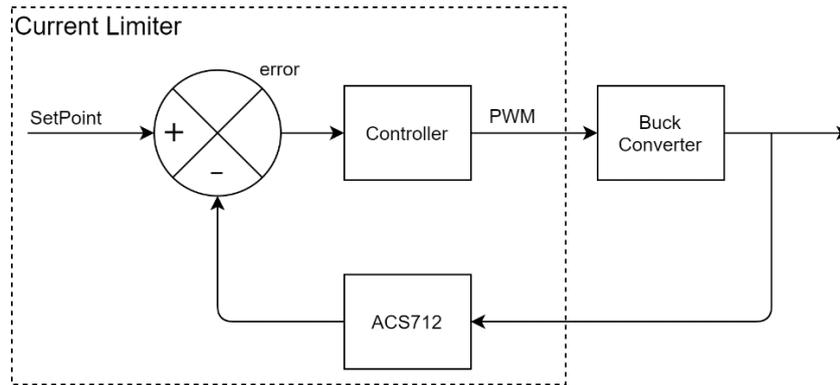
Setelah *buck converter* dan *current limiter* selesai dirakit, maka proses selanjutnya adalah menguji kemampuan alat. Pada proses ini *buck converter* akan diberi *input* tegangan lalu di ukur *output* tegangan serta arusnya untuk melihat batas kemampuannya. Pengukuran arus yang dilakukan pada *buck converter* menggunakan *current limiter* yang sudah terkalibrasi, namun belum ada proses aktuasi pengendalian (*open loop*).

Tahap selanjutnya adalah pengujian *close loop*, pada proses ini *current limiter* akan mengendalikan arus keluaran dari *buck converter* sesuai dengan target yang diberikan (*set point*). Indikator keberhasilan pada proses pengujian *close loop* ini adalah menciptakan pengendalian yang proporsional yaitu kombinasi terbaik antara *Settling Time* ( $T_s$ ), *Rise Time* ( $T_r$ ), *Peak Time* ( $T_p$ ), *Steady State Error* ( $e_{ss}$ ) dan *Overshoot*.

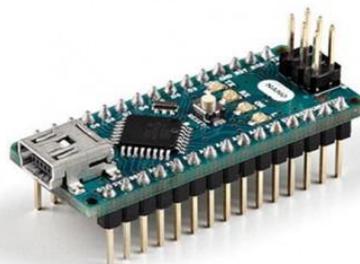
#### 3.2 Perancangan dan Perakitan Alat

##### 3.2.1 *Current Limiter*

*Current limiter* menggunakan Arduino Nano yang berfungsi untuk melakukan proses penerimaan input tegangan dari sensor arus ACS712, mengkonversi tegangan menjadi arus, perhitungan dan melakukan proses pengendalian output berdasarkan hasil perhitungan. Blok diagram *current limiter* dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Arduino Nano yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.2.

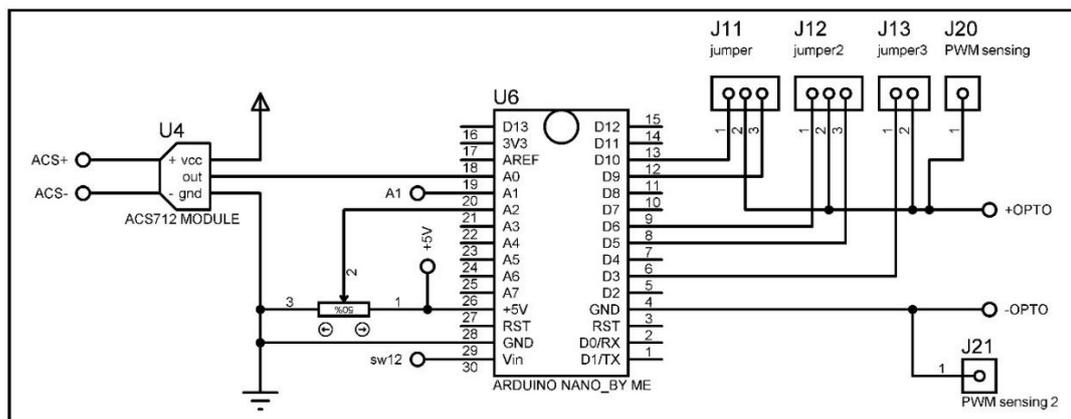


Gambar 3.1 Blok Diagram *Current Limiter*



Gambar 3.2 Arduino Nano

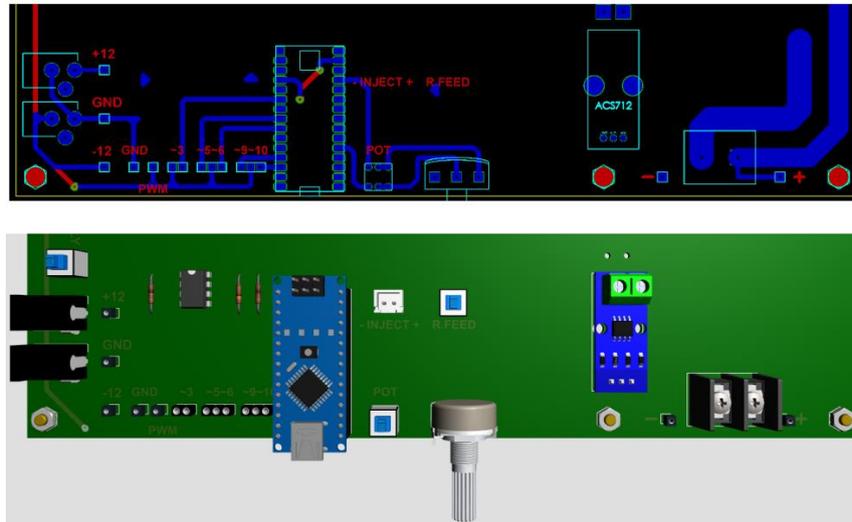
Rangkaian current limiter membutuhkan komponen pendukung lainnya agar dapat bekerja sebagai satu sistem seperti pada Gambar 3.1. Rangkaian keseluruhan Current Limiter dengan komponen pendukung dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Schematic Current Limiter*

Pada penelitian ini ACS712 yang digunakan memiliki kemampuan pembacaan arus sampai dengan 5A *bi-directional* yang artinya mampu membaca arus negatif dan positif. Pada pin output PWM arduino diberi connector jumper (J11, J12, J13 dan J20) yang berfungsi untuk memilih output pin mana yang akan digunakan sesuai dengan kebutuhan frekuensi yang diinginkan, pada penelitian ini pin yang akan digunakan adalah pin D9/D10 dengan frekuensi 3.906,25Hz.

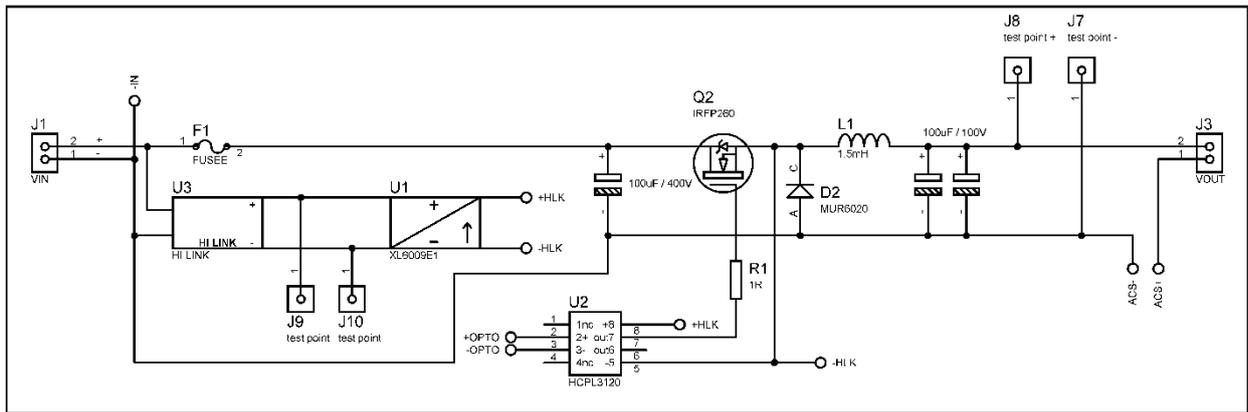
Tahapan berikutnya adalah mendesain *layout* PCB dan 3D desain guna melihat jarak antar komponen untuk mempermudah pada saat perakitan. Proses ini menghasilkan desain *layout* dan 3D seperti pada Gambar 3.4. Setelah desain *layout* dan 3D selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah merealisasikan desain kedalam bentuk PCB dan merakit komponen yang sudah disiapkan. Hasil perakitan PCB dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Desain Layout dan 3D *Current Limiter*

### 3.2.2 Buck Converter

Pada penelitian ini *buck converter* yang tersedia di pasaran akan sangat sulit untuk dimodifikasi dan dikendalikan sehingga peneliti memutuskan untuk merakit *buck converter* guna melakukan uji coba yang lebih fleksibel. *Buck converter* pada penelitian ini memiliki target spesifikasi tegangan keluaran 15V dengan arus 4A, maka pemilihan komponen serta perancangan skematik harus memiliki spesifikasi minimum sesuai target tersebut sesuai acuan. Desain skema awal *Buck Converter* dapat dilihat pada Gambar 2.2. Namun, desain tersebut membutuhkan komponen pendukung lainnya agar dapat diintegrasikan dengan *Current Limiter* yang berfungsi untuk mengendalikan output *Buck Converter*. Rangkaian *Buck Converter* dengan komponen pendukung dapat dilihat pada Gambar 3.5



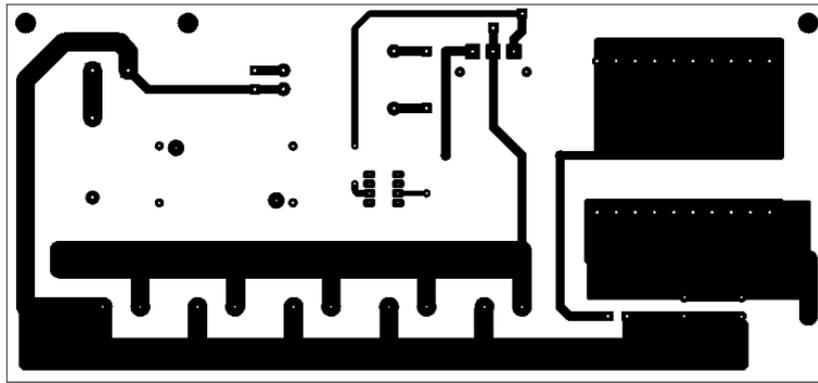
Gambar 3.5 Skema *Buck Converter* dengan komponen pendukung

Pada penelitian kali ini *buck converter* memiliki tegangan masukan sebesar 60V dengan arus 2A, sedangkan target keluaran dari *buck converter* yang dirakit memiliki tegangan keluaran sebesar 15V dengan arus minimal 4A. Sehingga pemilihan komponen seperti MOSFET, dioda dan kapasitor filter menyesuaikan dengan spesifikasi minimum yang dibutuhkan dengan *safety margin* untuk meminimalisir resiko komponen terbakar atau meledak.

MOSFET memiliki peran penting pada proses *buck* yaitu sebagai komponen utama untuk melakukan *switching*, sehingga pemilihan spesifikasi MOSFET harus memiliki *safety margin* yang tinggi untuk meminimalisir resiko MOSFET terbakar. Penelitian kali ini menggunakan MOSFET IRFP260 dengan *gate driver* HCPL3120.

Sistem suplai komponen bertegangan rendah menggunakan komponen Isolated HI LINK dengan tegangan keluaran sebesar 12V yang kemudian dinaikkan menggunakan *boost converter* menjadi 13V, yang mana merupakan tegangan minimum dari HCPL3120.

Setelah perancangan skematik dan penentuan komponen selesai, tahapan berikutnya adalah mendesain *Layout PCB* dan 3D desain untuk melihat jarak antar komponen dengan tujuan mempermudah pada saat perakitan. Proses ini menghasilkan desain *layout* dan 3D seperti pada Gambar 3.6. Setelah desain *layout* dan 3D selesai dibuat, tahap selanjutnya adalah merealisasikan desain kedalam bentuk PCB dan merakit komponen yang sudah disiapkan.



Gambar 3.6 Desain 3D *Buck Converter*

### 3.3 Perancangan Perangkat Lunak

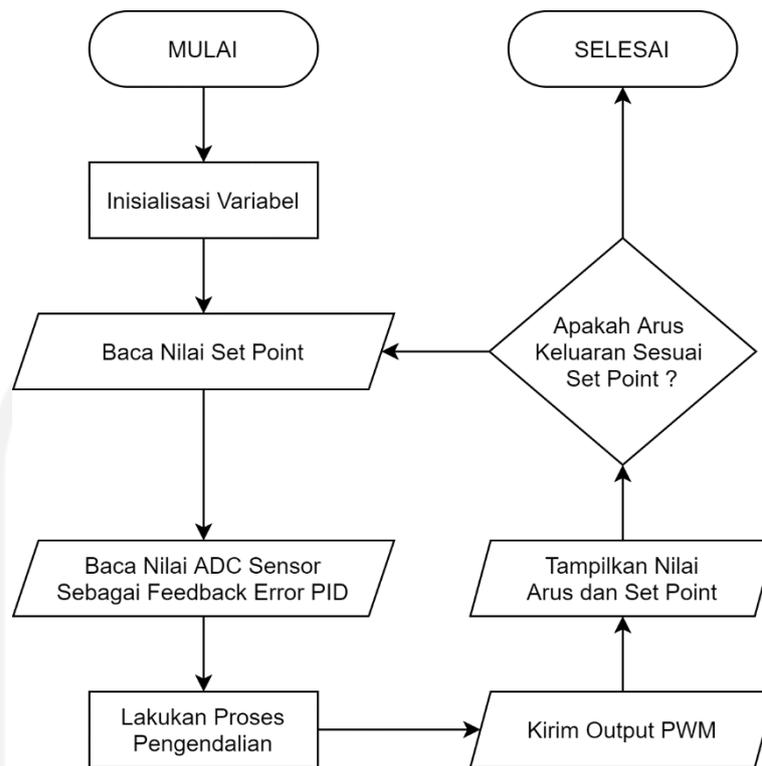
Program dirancang dengan menggunakan aplikasi *open source* Arduino IDE untuk dapat melakukan beberapa proses komputasi, salah satunya yaitu proses pembacaan sensor arus ACS712. Input dari ACS712 pada pin ADC Arduino Nano berupa tegangan 0V sampai 5V yang direpresentasikan sebagai ADC 0 sampai 1023 yang kemudian dikonversi menjadi arus dengan menggunakan persamaan (3.1).

$$I = \frac{\left(\frac{V_{ref}}{ADC_{max}}\right) \times ADC - \left(\frac{1}{2} \times V_{ref}\right)}{S} \quad (3.1)$$

Input arus hasil pembacaan ACS712 tersebut kemudian di komparasi dengan Nilai *Set Point* yang merupakan fungsi utama dari perangkat lunak yang dirancang sebagai proses pengendalian. Pengendali menggunakan pengendali PID dengan persamaan (3.2).

$$u(t) = P(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

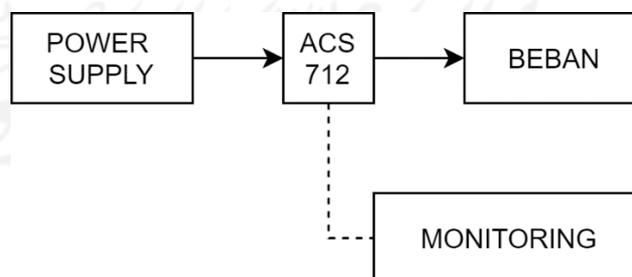
Hasil dari pengendalian tersebut kemudian dikeluarkan dalam bentuk PWM. Alur diagram kendali pada perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 3.7. Gambar 3.7



Gambar 3.7 Alur Diagram Pengendalian

### 3.4 Validasi Sensor Arus

Sensor arus ACS712 merupakan sensor *bi-directional* yang artinya mampu membaca arus yang bernilai positif dan negatif, namun pada percobaan kali ini sensor hanya digunakan untuk membaca arus positif dengan rentang antara 0A sampai 5A. Skema diagram validasi sensor arus dapat dilihat pada Gambar 3.8.

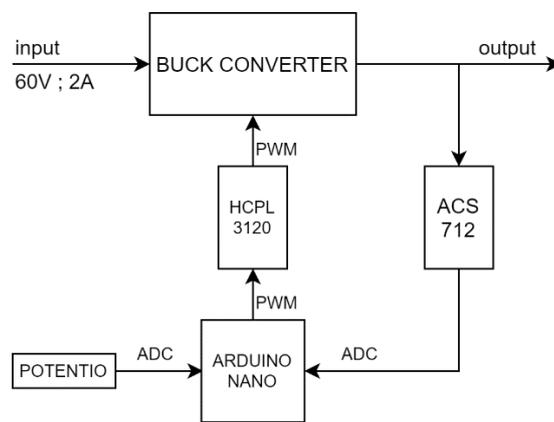


Gambar 3.8 Diagram Validasi

### 3.5 Pengujian Kalang Terbuka

*Buck converter* dirancang agar mampu mengeluarkan tegangan hingga 15V dengan arus 4A, sehingga pada proses kali ini *buck converter* akan di uji kemampuan batas maksimum dan batas minimum keluarannya.

Uji coba dilakukan dengan memberi input PWM ke *buck converter* dari 0% hingga 100%. Perubahan PWM ini yang kemudian akan merubah nilai *switching* pada MOSFET *buck converter* sehingga terjadi penurunan tegangan. PWM dapat di *adjust* dari 0% sampai 100% dengan menggunakan potensiometer yang sudah disematkan ke dalam rangkaian *current limiter*. Skema pengujian *buck converter* dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Diagram Pengujian *Buck Converter*

### 3.6 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan cara merekam data-data pada saat pengujian performa alat. Pengambilan data dilakukan dengan mencatat variable dari alat ukur yang digunakan. Variabel yang akan diambil berupa tegangan, arus dan Duty Cycle *buck converter*.

### 3.7 Analisis Data dan Penutup

Analisis mengulas tentang bagaimana respon kerja alat yang sudah dirancang, penjelasan tentang parameter yang dijadikan acuan keberhasilan serta kelebihan dan kekurangan pada alat yang sudah dirancang. Kemudian akan disimpulkan apakah alat yang sudah dirancang dan diuji dapat memenuhi batasan masalah yang sudah ditentukan sebagai parameter keberhasilan.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan perancangan kemudian melakukan perakitan dan serangkaian uji coba untuk mengumpulkan data yang kemudian data tersebut akan diolah dan dianalisis.

#### 4.1 Hasil Perakitan Alat

Perakitan alat dilakukan setelah merancang skematik dan mendapatkan spesifikasi komponen yang akan digunakan berdasarkan ketersediaan komponen. Setelah terpenuhi maka tahap berikutnya adalah membuat PCB dan merakit *current limiter* dan *buck converter*.



Gambar 4.1 Hasil Perakitan *Current Limiter*



Gambar 4.2 Hasil Perakitan *Buck Converter*

#### 4.2 Validasi Sensor Arus

Sensor Arus ACS712 yang digunakan umumnya tidak memerlukan regresi linear untuk melakukan kalibrasi karena tiap jenis sensor ACS712 sudah memiliki nilai konstanta untuk merubah nilai tegangan yang masuk pada pin ADC menjadi arus sehingga yang harus dilakukan adalah melakukan validasi terhadap tingkat akurasi dari konstanta tersebut. Sensor ACS712 yang digunakan pada percobaan ini memiliki konstanta 185mV/A.

Validasi dilakukan dengan cara mengukur arus yang keluar dari Power Supply Rigol831 menuju ke beban statis yang sudah dirancang menggunakan sensor arus ACS712, kemudian nilai yang terbaca pada sensor arus ACS712 akan di komparasi menggunakan alat ukur yang sudah terkalibrasi. Catu daya yang digunakan merupakan DC Power Supply RIGOL831 yang berfungsi sebagai suplai arus sekaligus alat ukur pembanding yang sudah terkalibrasi, sedangkan beban yang digunakan merupakan kombinasi resistor yang di paralel sebanyak 10 buah dengan total hambatan sebesar  $2.79\Omega$  dan kemampuan menghantarkan daya sebesar 100 Watt. DC Power Supply Rigol831 yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan beban statis yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.3 DC Power Supply RIGOL831



Gambar 4.4 Beban Statis

Dengan konfigurasi pengujian seperti pada Gambar 3.8 dilakukan pengujian sebanyak 10 kali dan dibandingkan antara arus yang terbaca pada sensor arus ACS712 dengan arus yang terbaca pada alat ukur yang sudah terkalibrasi yaitu DC Power Supply Rigol831. Nilai utama yang akan di validasi adalah pada arus 0A, 1A, 2A, 3A dan 4A karena nilai tersebut yang nantinya akan menjadi set point pada percobaan kalang tertutup sehingga hasil pembacaan pada arus 0A, 1A, 2A, 3A dan 4A harus dipastikan akurat, lalu 5 data lainnya yang akan di validasi merupakan nilai acak sebagai data pelengkap untuk menghitung tingkat akurasi sensor. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Tabel Pengujian Validasi Sensor ACS712

Arus Power Supply (A)	Arus ACS712 (A)	Selisih	%error
0	0	0	0,0
0,5	0,5	0	0,0
1,0	0,98	0,02	2,0
1,3	1,29	0,01	0,8
2,0	1,98	0,02	1,0
2,5	2,51	0,01	0,4
3,0	3,01	0,01	0,3
3,3	3,30	0	0,0
3,7	3,70	0	0,0
4,0	4,01	0,01	0,2

Persentase nilai error dari hasil percobaan diatas berkisar antara 0% sampai 2% dengan persentase akurasi berada disekitar 98%. Dengan persentase akurasi sebesar 98% maka data sensor tersebut dapat dikatakan valid untuk digunakan sebagai *feedback* pada saat melakukan pengujian sistem kalang tertutup.

#### 4.3 Pengujian Kalang Terbuka

*Buck converter* dirancang agar mampu mengeluarkan tegangan hingga 20V dengan arus 5A. Berdasarkan konfigurasi pengujian seperti pada Gambar 3.9 dilakukan pengujian dilakukan sebanyak 11 kali dengan variasi PWM yang berbeda-beda dalam rentang 10 - 255. Hasil monitoring dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kalang Terbuka

$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$P_{in}$ (W)	PWM	Duty Cycle	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{out}$ (W)	Efisiensi (%)
60	0,09	5,40	17	7,03	3,266	1,15	3,7559	69,5537
60	0,21	12,60	26	10,16	5,23	1,83	9,5709	75,95952
60	0,30	18,00	31	12,50	6,25	2,17	13,5625	75,34722
60	0,41	24,60	36	14,94	7,36	2,55	18,768	76,29268
60	0,59	35,40	43	15,62	8,87	3,01	26,6987	75,42006
60	0,74	44,40	48	18,75	9,91	3,36	33,2976	74,99459
60	0,98	58,80	55	21,87	11,75	3,77	44,2975	75,33588
60	1,17	70,20	60	23,08	12,40	4,23	52,452	74,71795
60	1,41	84,60	66	30,77	13,58	4,61	62,6038	73,99976
60	1,73	103,800	75	33,33	14,81	5,20	77,012	74,19268

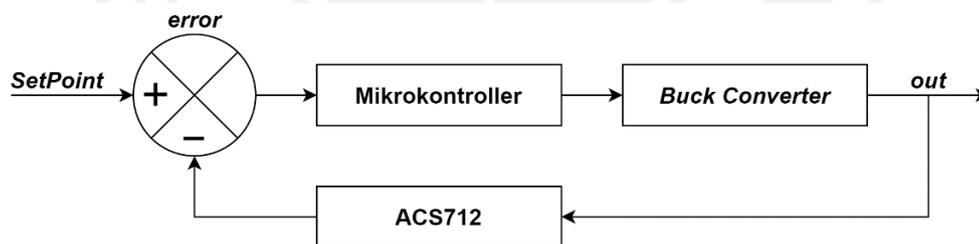
Berdasarkan data yang didapat pada Tabel 4.2 *buck converter* sudah mampu melakukan konversi tegangan dari 60V menjadi 3V hingga 14V, besaran tegangan hasil konversi dipengaruhi oleh besaran PWM yang di input. Semakin besar PWM yang diatur maka semakin besar tegangan keluaran yang dihasilkan. Berdasarkan Tabel 4.2 tegangan tertinggi yang dapat dihasilkan pada

PWM 75 adalah sebesar 14.81V yang berarti masih sudah mencapai target yaitu sebesar 14V. Apabila PWM dinaikkan lebih tinggi lagi tegangan mampu mencapai target yang ditentukan namun hal tersebut tidak diperlukan saat pengujian berikutnya karena target arus sudah mencapai 5A, range arus tersebut yang dibutuhkan saat proses pengujian kalang tertutup.

Rata-rata efisiensi *buck converter* saat melakukan proses konversi adalah 74.5% yang berarti *buck converter* tidak menghasilkan banyak panas sehingga dapat dikatakan siap digunakan untuk melakukan pengujian kalang tertutup. Nilai efisiensi didapat dari selisih antara daya yang masuk ( $P_{in}$ ) dengan daya yang keluar ( $P_{out}$ ).

#### 4.4 Pengujian Kalang Tertutup

Setelah melakukan validasi sensor arus ACS712 dan pengujian *buck converter* dengan sistem kalang terbuka, maka komponen pendukung untuk menciptakan sebuah sistem *buck converter* yang terintegrasi dengan pengendali PID sebagai pembatas arus sudah siap. Berikutnya adalah mengintegrasikan ketiga komponen utama tersebut sehingga menjadi sistem seperti blok diagram pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Blok Diagram Kalang Tertutup

Mengacu pada Gambar 4.5, *current limiter* merupakan sistem integrasi gabungan antara mikrokontroler dan ACS712. Langkah berikutnya adalah membuat pengendali PID sebagai sistem kendali.

##### 4.4.1 Membuat Pengendali PID

Program yang digunakan merupakan *library* yang tersedia secara gratis dan diunduh melalui *software* Arduino IDE. Pada proses perancangan pengendali PID ini penulis tidak menggunakan metode pendekatan untuk menentukan nilai *gain* P, I dan D melainkan metode yang digunakan adalah *trial and error*. Pertimbangannya adalah karena sistem yang akan diuji memiliki respon yang sangat cepat dan kinerja *buck converter* dibatasi oleh PWM yang akan di limit pada parameter kontrol PID, sehingga memungkinkan untuk melakukan pengujian berkali-kali dengan cepat dan aman. Parameter yang dibatasi pada control PID yang dirancang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

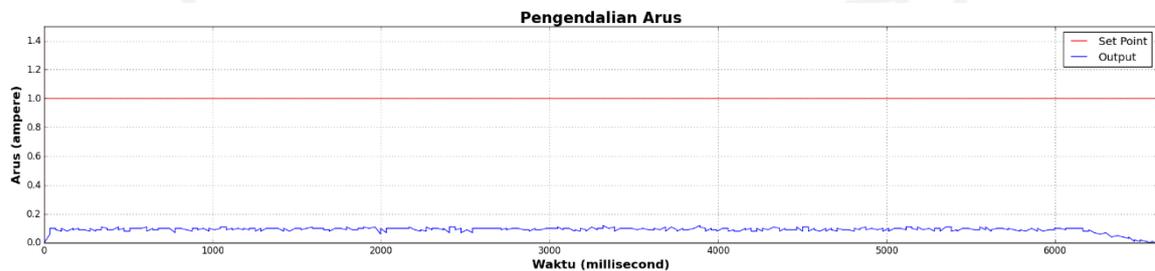
Tabel 4.3 Parameter Pengendali PID

Frekuensi PWM	PWM		Sampling Time
	Batas Atas	Batas Bawah	
7,812.5 Hz	10	75	100mS

Pengujian dilakukan secara bertahap dengan menaikkan *gain* P, I dan D satu persatu sembari memperhatikan respon hasil kendali terhadap *buck converter* melalui *serial plotter* yang terdapat pada *software* Arduino IDE.

#### A. Percobaan 1

Pada pengujian pertama nilai *gain* P, I dan D yang digunakan berturut-turut adalah 0.1, 0, 0, dengan nilai *set point* arus 1A. Nilai P yang digunakan sangat rendah untuk menguji seberapa cepat *buck converter* mampu merespon sinyal kendali yang diberikan.

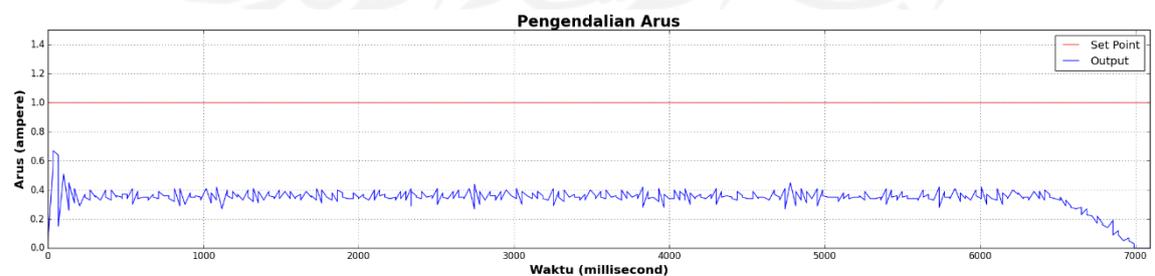


Gambar 4.6 Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 1

Dengan parameter *gain* P, I dan D berturut-turut 0.1, 0 dan 0, respon kerja alat masih belum mampu mencapai nilai *set point* dikarenakan nilai *gain* proportional masih terlalu rendah. Berdasarkan Gambar 4.6 arus keluaran dari *buck converter* tidak mampu mencapai *set point* yaitu 1A dan hanya mampu mencapai arus kurang lebih 0.2A.

#### B. Percobaan 2

Pada pengujian kedua nilai nilai *gain* P, I dan D yang digunakan berturut-turut adalah 0.4, 0, 0, dengan nilai *set point* arus 1A. Nilai P yang digunakan lebih tinggi dari sebelumnya untuk menguji apakah *buck converter* mampu mencapai *set point* dengan nilai P yang diberikan.

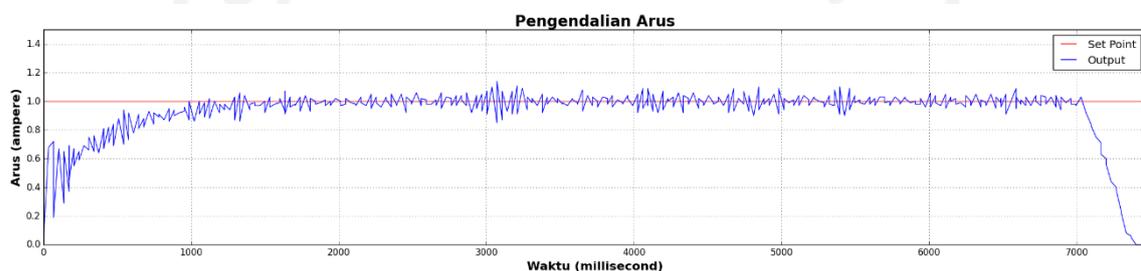


Gambar 4.7 Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 2

Dengan parameter *gain* P, I dan D berturut turut 0.4, 0 dan 0, respon kerja alat masih belum mampu mencapai nilai *set point* yang diberikan yaitu 1A, dimana *buck converter* hanya mampu mencapai arus kurang lebih 0.4A berdasarkan pada Gambar 4.7. Namun, nilai *gain* P tersebut merupakan nilai *gain* P maksimum yang berarti apabila nilai *gain* lebih besar dari 0.4 maka tidak akan membantu *buck converter* untuk mencapai *set point* dan hanya akan membuat respon semakin berisolasi.

### C. Percobaan 3

Pada pengujian ketiga nilai *gain* P, I dan D yang digunakan berturut-turut adalah 0.4, 0.4, 0, dengan nilai *set point* arus 1A. Nilai P yang digunakan masih sama yaitu 0.4 namun parameter kali ini ditambahkan *gain* I.

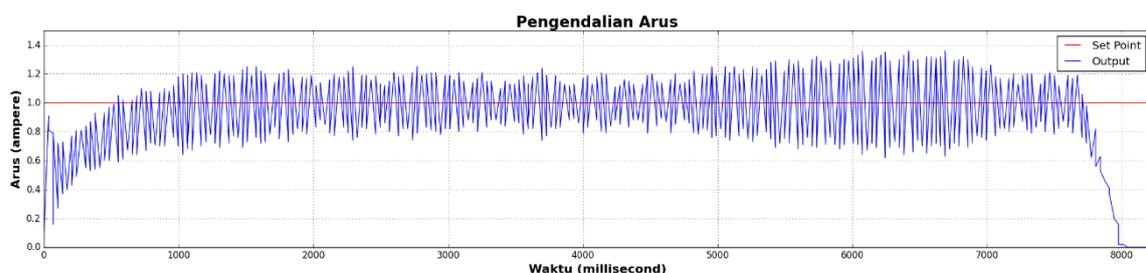


Gambar 4.8 Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 3

Dengan parameter *gain* P, I dan D berturut turut 0.4, 0.4 dan 0, respon kerja alat sudah mampu mencapai nilai *set point* yang diberikan yaitu 1A. Berdasarkan Gambar 4.8 *buck converter* mampu mencapai arus 1A dalam waktu 1 detik dan memasuki kondisi *steady state* pada detik ke-2. Nilai *gain* I membantu *buck converter* untuk mencapai nilai *set point*.

### D. Percobaan 4

Pada pengujian keempat nilai *gain* P, I dan D yang digunakan berturut-turut adalah 0.45, 0.4, 0, dengan nilai *set point* arus 1A. Nilai *gain* P sedikit dinaikkan untuk melihat apakah *gain* P mampu mempercepat respon *buck converter* dalam mencapai *set point* atau justru hanya menambah isolasi pada respon.

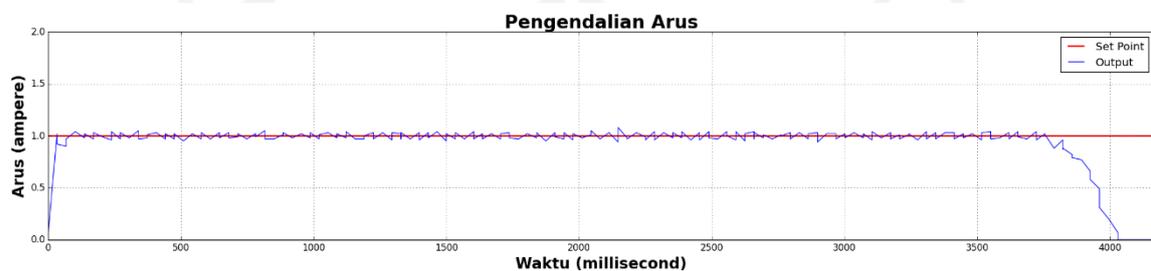


Gambar 4.9 Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 4

Berdasarkan Gambar 4.9 apabila *gain* P sedikit dinaikkan dengan nilai *gain* I yang sama ternyata hanya membuat *buck converter* semakin berisolasi tanpa mempercepat respon *buck converter* untuk mencapai *set point*. Pengujian ini membuktikan bahwa nilai P tersebut sudah maksimum sehingga tidak dapat ditambah lagi.

#### E. Percobaan 5

Pada pengujian kelima nilai *gain* P, I dan D yang digunakan berturut-turut adalah 0.02, 5, 0, dengan nilai *set point* arus 1A. Nilai *gain* I dinaikkan karena berdasarkan percobaan sebelumnya nilai *gain* I terbukti mampu memperhalus respon *buck converter* sedangkan nilai *gain* P diturunkan sebagai kompensasi kenaikan nilai *gain* I. Apabila *gain* P bernilai sama dengan percobaan sebelumnya maka hanya akan menghasilkan isolasi karena pengendali I dan P memiliki sifat yang hampir sama.



Gambar 4.10 Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 5

Jika dibandingkan dengan percobaan 3 dan 4, pada percobaan kali ini respon *buck converter* menjadi lebih halus dan lebih cepat dalam mencapai *set point*. Data respon *buck converter* pada percobaan 5 dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Data Respon *Buck Converter* Pada Percobaan 5

MILLISECOND	SP	RESPON
0	1.00	0.08
33	1.00	1.02
33	1.00	0.92
67	1.00	0.90
67	1.00	0.97
102	1.00	1.04
136	1.00	0.98
136	1.00	1.02
170	1.00	0.97
170	1.00	1.03
204	1.00	0.99

Berdasarkan Tabel 4.4 sangat sulit untuk mengetahui nilai *rise time* dan *peak time* karena respon *buck converter* terhadap pengendali terlalu cepat dimana hanya membutuhkan waktu 102ms untuk mencapai kondisi *settling time* sehingga data yang dibutuhkan untuk menentukan

nilai *rise time* dan *peak time* tidak masuk kedalam sampling time dari serial monitor Arduino. Data disampling selama 4.1 detik dan berhasil mendapatkan sebanyak 210 data. Kumpulan data tersebut disimpulkan dalam Tabel 4.5.

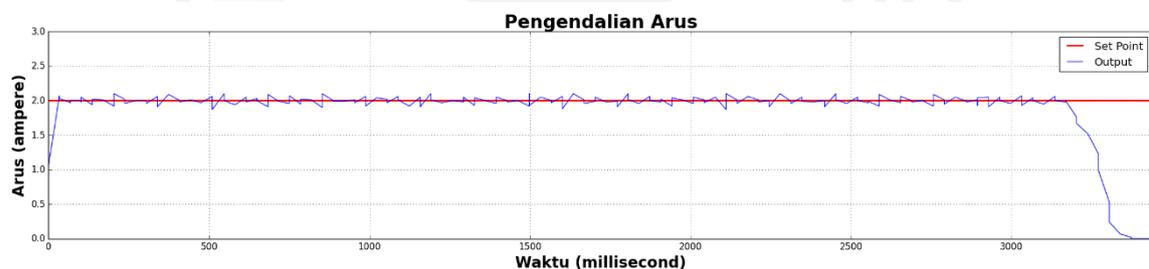
Tabel 4.5 Tabel Hasil Percobaan 5

P	I	D	SP	Settling		Overshoot	Steady State Error		
			(A)	Time (s)	Min (A)	Max (A)	(A)	<5%	>5%
0.02	5	0	1	0.102	0.94	1.08	-	0.95	1.05

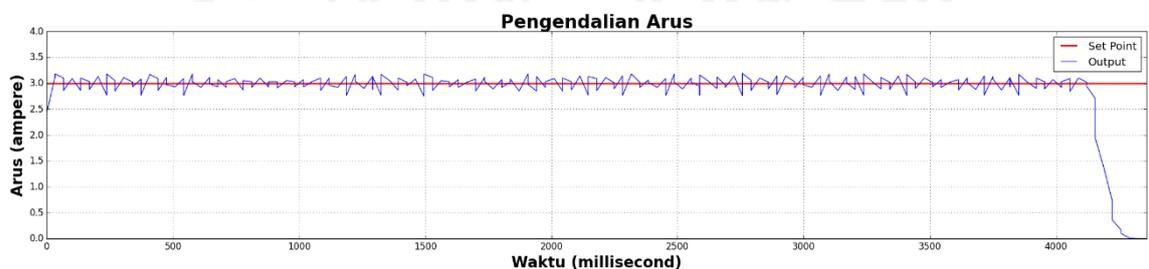
Berdasarkan Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa nilai *steady-state error* dari *buck converter* masih belum memenuhi nilai kurang dari 5%. Namun, hal tersebut masih dapat ditoleransi mengingat selisih *error* hanya terpaut 2 angka dibelakang koma yang mana nilai tersebut sangat kecil dan dapat ditoleransi. Maka dapat disimpulkan bahwa pengendali P, I dan D berturut-turut 0.02, 5 dan 0 merupakan pengendali terbaik yang dirancang saat ini.

#### 4.4.2 Validasi Pengendali PID

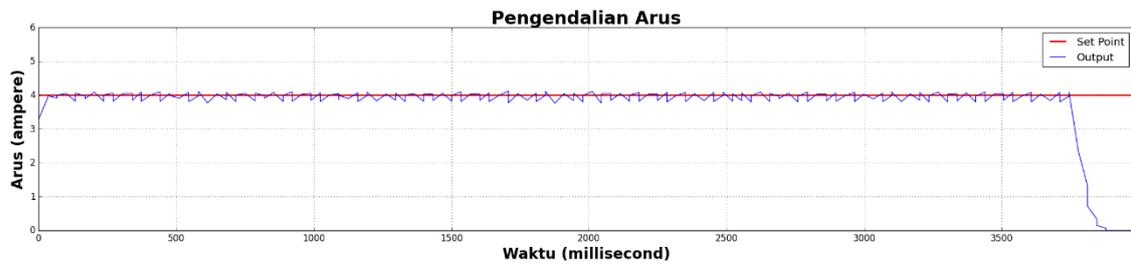
Mengacu pada percobaan ke-1 sampai percobaan ke-5, pengendali yang terbaik adalah pengendali dengan parameter *gain* P, I dan D berturut-turut sebesar 0.02, 5 dan 0. Langkah selanjutnya adalah melakukan validasi apakah pengendali tersebut dapat digunakan dengan nilai *set point* yang berbeda-beda.



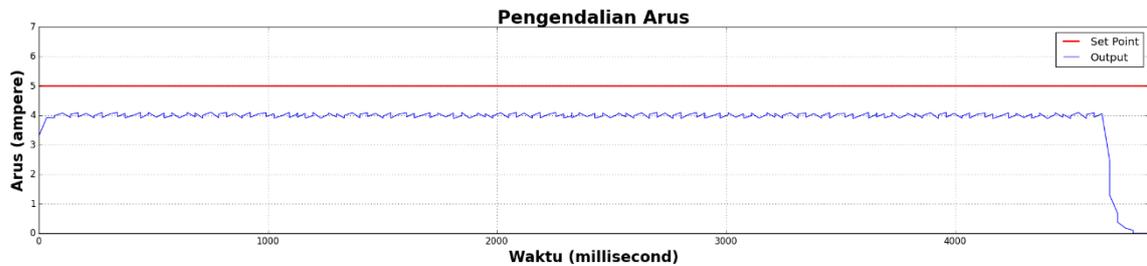
Gambar 4.11 Grafik Validasi 2A



Gambar 4.12 Grafik Validasi 3A



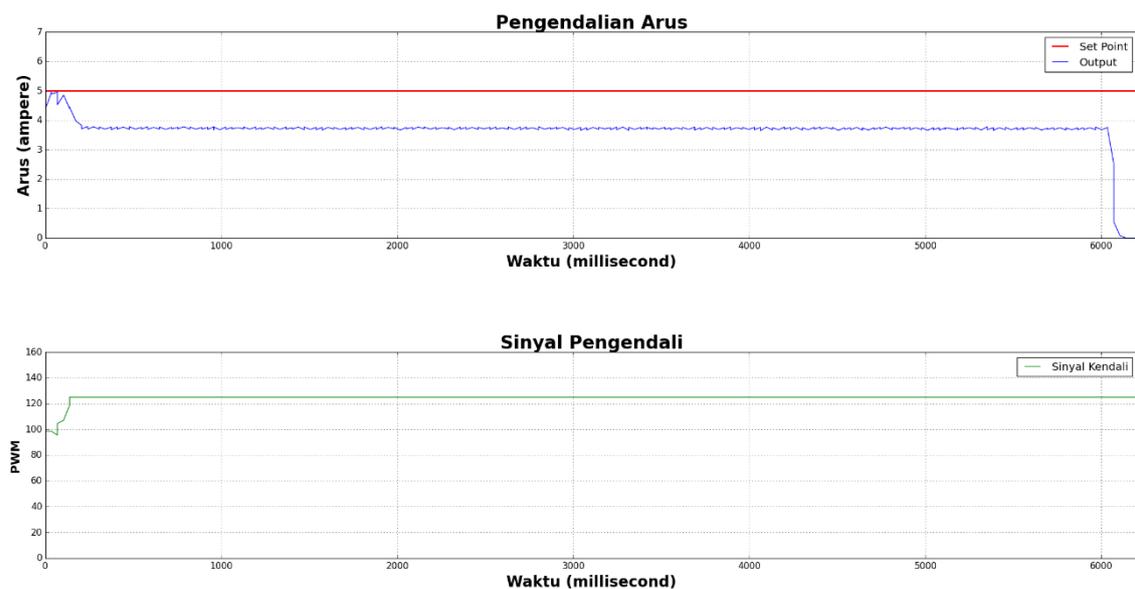
Gambar 4.13 Grafik Validasi 4A



Gambar 4.14 Grafik Validasi 5A

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.11, Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 dapat disimpulkan bahwa pengendali PID dengan nilai *gain* P, I dan D berturut-turut 0.02, 5 dan 0 mampu menstabilkan respon *buck converter* pada *set point* arus 1A, 2A, 3A dan 4A. Namun, pada *set point* 5A pengendali PID yang dirancang tidak mampu mengangkat respon *buck converter* hingga mencapai *set point*.

Pada seluruh percobaan kalang tertutup di atas maksimum PWM dibatasi di 75 dari 255, sehingga kemungkinan respon *buck converter* tidak mampu mencapai 5A dikarenakan batas sinyal kendali tidak mampu melebihi batas tertinggi PWM.



Gambar 4.15 Validasi 5A Dengan Batas Tertinggi 125 PWM

Pada Gambar 4.15 pengendali PID yang sama diuji dengan *set point* yang sama yaitu 5A namun batas tertinggi PWM dinaikkan menjadi 125 dan respon *buck converter* masih tidak mampu mencapai *set point*. Dapat dilihat juga pada grafik sinyal pengendali bahwa PID sudah berusaha menaikkan respon *buck converter* dengan memberi batas tertinggi PWM sebesar 125 namun respon tetap tidak mampu mencapai *set point*.

Berdasarkan beberapa validasi diatas maka pengendali dengan nilai P, I dan D berturut-turut adalah 0.02, 5 dan 0 akan dianggap sebagai pengendali yang terbaik dan valid untuk digunakan pada penelitian lebih lanjut dengan mempertimbangkan pengujian pada batas 1A sampai 4A.

#### 4.4.3 Pengujian Sistem *Current Limiter*

Karena pada *set point* 5A pengendali PID tidak mampu mengkompensasi respon *buck converter* untuk mencapai *set point* maka pengujian sistem *current limiter* akan menggunakan *set point* 3A karena dianggap tidak terlalu dekat dengan 5A dimana pengendali saat ini tidak mampu mencapai nilai tersebut dan nilai *set point* 3A juga tidak terlalu rendah apabila digunakan sebagai pengujian *current limiter*.

Skenario pengujian *current limiter* adalah dengan merubah daya masukan dari *buck converter* dan arus keluaran dari *buck converter* akan dimonitoring apakah arus keluaran *buck converter* berubah seiring dengan perubahan daya pada masukan *buck converter* atau tidak.

##### A. Menentukan Daya Minimum

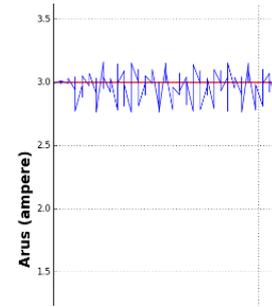
Percobaan ini dilakukan untuk menemukan daya minimum yang diperlukan oleh *buck converter* pada saat melakukan proses konversi dengan *set point* 3A dan dengan menggunakan pengendali yang sudah ditentukan.



Gambar 4.16 Data Tegangan, Arus dan Daya Masukan



(a)



(b)

Gambar 4.17 Data Tegangan (a) dan Arus (b) Keluaran

Untuk menghitung daya minimum yang dibutuhkan oleh *buck converter* saat melakukan konversi dapat dilakukan dengan membandingkan daya masukan pada Gambar 4.16 terhadap daya keluaran dengan menghitung nilai tegangan keluaran (a) dikali dengan arus keluaran (b) pada Gambar 4.17.

Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Untuk Mencari Daya Minimum *Buck Converter*

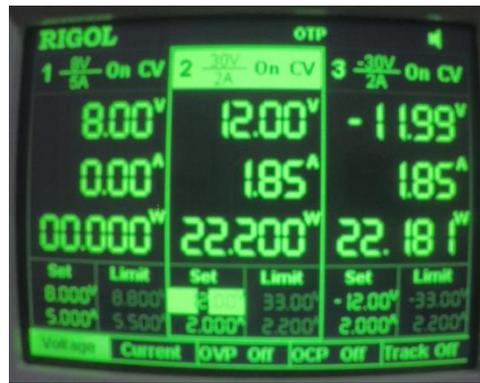
P	I	D	SP (A)	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>in</sub> (I)	W <sub>in</sub> (W)	V <sub>out</sub> (V)	I <sub>out</sub> (I)	W <sub>out</sub> (W)	Selisih Daya (W)	Efisiensi
0.02	5	0	3	60	0.75	45	12.03	3	36.09	8.91	80.20%

Berdasarkan Tabel 4.6 *buck converter* memerlukan daya sebesar 45 watt pada masukannya ketika melakukan konversi, selisih antara daya masukan dan keluaran adalah sebesar 8.91 watt dengan efisiensi sebesar 80.2%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada percobaan ini daya minimum yang dibutuhkan adalah sebesar 45 watt.

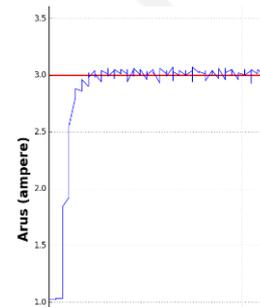
Percobaan berikutnya akan menguji apakah dengan tegangan dan arus yang berbeda *buck converter* masih mampu melakukan konversi dengan set point yang sudah ditentukan.

#### B. Pengujian Dengan Variasi Tegangan dan Arus Masukan

Pada percobaan ini sumber tegangan diatur menjadi lebih rendah yaitu 12V dengan arus yang lebih tinggi yaitu 1.85A untuk mendapatkan daya minimum yang dibutuhkan yaitu 45 watt. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk membuktikan apakah *current limiter* yang dirancang dengan menggunakan pengendali PID mampu mengkompensasi set point dengan daya masukan yang berubah-ubah.



Gambar 4.18 Data Tegangan, Arus dan Daya Masukan



(a)

(b)

Gambar 4.19 Data Tegangan (a) dan Arus (b) Keluaran

Gambar 4.18 menunjukkan nilai tegangan, arus dan daya masukan sesuai dengan yang sudah ditentukan. Sedangkan pada Gambar 4.19 merupakan nilai tegangan dan arus keluaran. Data kedua hasil percobaan tersebut dirangkum pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data Hasil Pengujian Dengan Tegangan dan Arus Masukan Berbeda

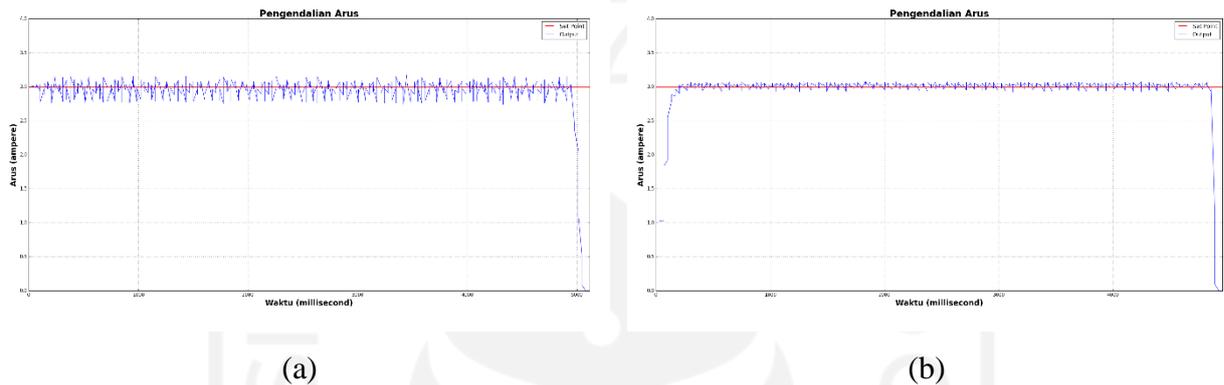
P	I	D	SP (A)	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>in</sub> (I)	W <sub>in</sub> (W)	V <sub>out</sub> (V)	I <sub>out</sub> (I)	W <sub>out</sub> (W)	Selisih Daya (W)	Efisiensi
0.02	5	0	3	24	1.85	44.4	12.05	3	36.15	8.25	81.42%

#### 4.5 Hasil dan Analisa

Pada proses validasi pengendali yang sudah dirancang, respon *buck converter* tidak mampu mencapai *set point* pada arus 5A yang disebabkan oleh nilai *gain* proportional yang terlalu rendah. Hal ini dibuktikan dengan sinyal kendali pada Gambar 4.15 yang sudah mencapai batas maksimum *limit* PWM ketika respon tidak mampu mencapai *set point* namun karena nilai *gain* proportional terlalu rendah maka respon tetap tidak dapat mencapai *set point*. Dapat disimpulkan bahwa pengendali yang dirancang dengan parameter *gain* P,I dan D berturut-turut 0.02, 5 dan 0 hanya dapat melakukan beberapa pengendalian pada set point tertentu, yang pada pengujian kali ini adalah 1A sampai 4A. Apabila ingin melakukan pengendalian dengan set point yang lebih tinggi

dari 4A maka pengendali yang sudah dirancang tidak lagi relevan sehingga membutuhkan nilai pengendali PID yang baru.

Pengendali yang sudah dirancang kemudian diuji pada kondisi tegangan dan arus yang berbeda namun dengan besar daya yang sama yaitu 45 watt. Hasil dari percobaan ini adalah current limiter dengan pengendali PID yang sudah dirancang mampu membatasi arus sesuai dengan set point meskipun tegangan dan arus masukan dari buck converter berubah-ubah. Pengendali PID yang dirancang juga membuat keluaran buck converter menjadi lebih stabil dan lebih cepat.



Gambar 4.20 Grafik Hasil Pengujian *Current Limiter* 1 (a) dan 2 (b)

Beberapa parameter pengendalian yang diukur pada Gambar 4.20 seperti overshoot, settling time, settling max dan settling min pada pengujian sistem current limiter 1 dan 2 akan dirangkum pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.11 dengan nilai steady-state error 5%. Nilai rise time dan peak time tidak dapat diukur dikarenakan respon *buck converter* terlalu cepat sehingga tidak masuk kedalam resolusi pada serial monitoring Arduino.

Tabel 4.8 Parameter Daya Terukur Pada Pengujian *Current Limiter* 1

P	I	D	SP (A)	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>in</sub> (I)	W <sub>in</sub> (W)	V <sub>out</sub> (V)	I <sub>out</sub> (I)	W <sub>out</sub> (W)	Selisih Daya (W)	Efisiensi
0.02	5	0	3	60	0.75	45	12.03	3	36.09	8.91	80.20%

Tabel 4.9 Parameter Terukur Pengendali Pada Pengujian *Current Limiter* 1

P	I	D	SP	Settling			Overshoot	Steady-State Error	
			(A)	Time (s)	Min (A)	Max (A)	(A)	<5%	>5%
0.02	5	0	3	0.03	2.74	3.19	-	2.85	3.15

Tabel 4.10 Parameter Daya Terukur Pada Pengujian *Current Limiter* 2

P	I	D	SP (A)	V <sub>in</sub> (V)	I <sub>in</sub> (I)	W <sub>in</sub> (W)	V <sub>out</sub> (V)	I <sub>out</sub> (I)	W <sub>out</sub> (W)	Selisih Daya (W)	Efisiensi
0.02	5	0	3	24	1.85	44.4	12.05	3	36.15	8.25	81.42%

Tabel 4.11 Parameter Terukur Pengendali Pada Pengujian *Current Limiter 2*

P	I	D	SP	Settling			Overshoot	Steady-State Error	
			(A)	Time (s)	Min (A)	Max (A)	(A)	<5%	>5%
0.02	5	0	3	0.2	2.92	3.08	-	2.85	3.15

Kedua sistem sama sama tidak memiliki overshoot, dengan *settling time* yang terpaut sangat cepat yaitu 0.03 detik pada percobaan pertama dan 0.2 detik pada percobaan kedua. Berdasarkan Tabel 4.8 pada percobaan pertama respon *buck converter* tidak mencapai *steady-state error* dibawah 5%, sedangkan berdasarkan Tabel 4.10 pada percobaan kedua respon *buck converter* memiliki *steady-state error* dibawah 5%. Hal ini disebabkan oleh perbedaan tegangan masukan antar kedua percobaan, pada percobaan pertama tegangan masukannya adalah 60V sedangkan percobaan kedua 24V, kondisi ini membuat *buck converter* lebih mudah untuk menstabilkan respon pada percobaan kedua namun kekurangannya adalah *settling time* pada percobaan kedua tidak secepat percobaan pertama.



## BAB 5

### KESIMPULAN & SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa hasil yang telah disimpulkan sebagai berikut:

1. *Buck converter* dan *current limiter* yang dirancang berjalan dengan sangat baik dimana efisiensi dari *buck converter* itu sendiri mencapai 74.5% dan akurasi sensor arus pada *current limiter* mencapai 98%.
2. Rancangan pengendali PID dengan parameter *gain* P, I dan D berturut-turut sebesar 0.02, 5 dan 0 yang ditanamkan pada *current limiter* berjalan dengan sangat baik pada arus 0A sampai 4A, namun apabila melebihi 4A maka membutuhkan pengendali dengan parameter *gain* P, I dan D yang baru.
3. Sistem integrasi antara *buck converter* dengan *current limiter* dengan pengendali PID dapat berjalan baik pada kondisi tegangan dan arus masukan pada *buck converter* berubah-ubah selama perubahan tersebut memenuhi daya minimum yang dibutuhkan *buck converter* ketika melakukan konversi dengan rata-rata efisiensi kurang lebih sebesar 80.8%.

#### 5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, penulis memiliki beberapa saran untuk penelitian kedepannya agar performa dari sistem menjadi lebih baik lagi, yaitu:

1. Pada percobaan ini pengendali PID mengendalikan arus keluaran pada *buck converter* dengan merubah tegangan yang melalui MOSFET sehingga responnya menjadi sangat cepat sekali. Sebaiknya *sampling time* pengendali PID dibuat dibawah 100ms agar proses pengendalian menjadi lebih cepat.
2. Beban yang digunakan lebih baik memakai beban variabel yang dapat diatur nilai tahanannya, sehingga selain daya masukan yang dapat diubah-ubah parameternya diharapkan beban juga dapat diubah-ubah nilai tahanannya untuk merepresentasikan beban yang nilai tahanannya dapat berubah seperti baterai.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Harjanne and J. M. Korhonen, “Abandoning the concept of renewable energy,” *Energy Policy*, vol. 127, no. December 2018, pp. 330–340, 2019.
- [2] L. E. Singer and D. Peterson, *International Energy Outlook 2016*, vol. 0484, no. May. 2016.
- [3] A. Chatterjee and K. B. Mohanty, “Current control strategies for single phase grid integrated inverters for photovoltaic applications-a review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April, pp. 554–569, 2018.
- [4] D. Ren, X. Feng, L. Lu, X. He, and M. Ouyang, “Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions,” *Appl. Energy*, vol. 250, no. May, pp. 323–332, 2019.
- [5] X. Tong *et al.*, “Analysis and optimization of the switching noise for Super-junction MOSFET in full bridge converter system,” *Solid State Electron.*, vol. 161, no. January, p. 107638, 2019.
- [6] A. Pandey and D. Singh, “A Buck Converter Based On PID Controller for Voltage Step-Down Application,” vol. 4, no. 12, pp. 2013–2016, 2015.
- [7] S. P. Singh, D. K. Singh, H. Kumar, and R. Dwivedi, “Designing and Parametric Variation of PI Controller for Buck Converter for Constant,” vol. 13, no. 4, pp. 169–174, 2014.
- [8] L. Cavanini, G. Cimini, and G. Ippoliti, “Model predictive control for pre-compensated power converters : Application to current mode control,” *J. Franklin Inst.*, vol. 356, no. 4, pp. 2015–2030, 2019.
- [9] A. Fitriandi, E. Komalasari, and H. Gusmedi, “Rancang Bangun Alat Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Mikrokontroler dengan SMS Gateway.pdf,” *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 10 no.2, no. Mei, pp. 87–98, 2016.
- [10] J. Dong, R. Liu, K. Tang, Y. Wang, X. Zhang, and Z. Su, “Sparse gradient pursuit for robust visual analysis,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 10111 LNCS, no. December 2011, pp. 369–384, 2017.