

**SLIDING MODE CONTROLLER UNTUK PENGENDALIAN
TEGANGAN KELUARAN PADA SEPIC CONVERTER**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



ALIEF AULIA PRADIKA WIJAYA
NIM. 165060301111030

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG

2020



LEMBAR PENGESAHAN

SLIDING MODE CONTROLLER UNTUK PENGENDALIAN
TEGANGAN KELUARAN PADA *SEPIC CONVERTER*

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



ALIEF AULIA PRADIKA WIJAYA

NIM. 165060301111030

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

Lunde Ardenta, S.T., M.Sc.
NIK. 201607 880301 1 001

Mengetahui,

Asisten Dosen Teknik Elektro



Prof. Sri Hadi Sukro, S.T., M.T., Ph.D., IPU.
NIK. 19730520 200801 1 013

JUDUL SKRIPSI :

SLIDING MODE CONTROLLER UNTUK PENGENDALIAN TEGANGAN KELUARAN
PADA *SEPIC CONVERTER*

Nama Mahasiswa : Alief Aulia Pradika Wijaya

NIM : 165060301111030

Program Studi : Teknik Elektro

Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Dr. Ir. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.



.....

Anggota : Lunde Ardhenta, S.T., M.Sc.



.....

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Ir. Hery Purnomo, M.T.

disetujui tanggal 16 Juli 2020



Dosen Penguji 2 : Dr. Tri Nurwati, S.T., M.T.

disetujui tanggal 16 Juli 2020



Tanggal Ujian : 26 Juni 2020

SK Penguji : No. 1109 Tahun 2020



*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada:
Ayahanda Sodikun dan Ibunda Etikah Suhesti Tercinta*

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

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

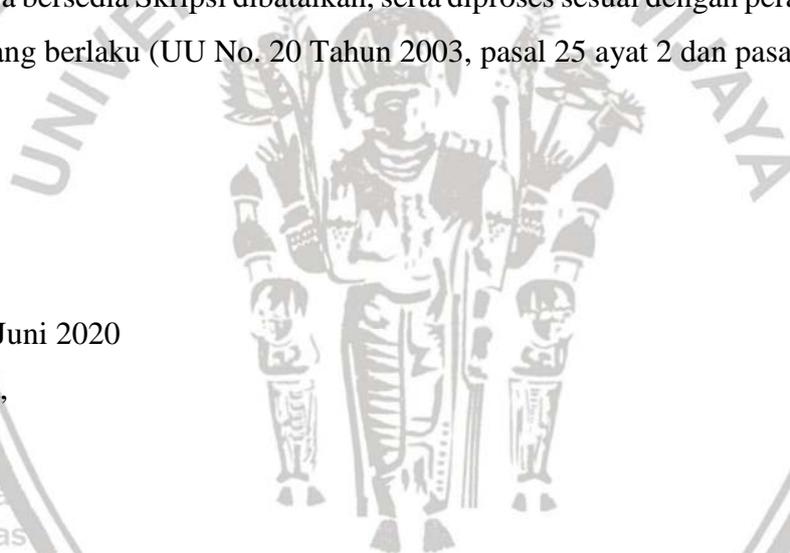
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 3 Juni 2020

Mahasiswa,

Alief Aulia Pradika Wijaya

NIM 165060301111030



RINGKASAN

Alief Aulia Pradika Wijaya, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2020, *Sliding Mode Controller untuk Pengendalian Tegangan Keluaran pada SEPIC Converter*, Dosen Pembimbing : Rini Nur Hasanah dan Lunde Ardhenta

DC-DC converter merupakan rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk meregulasi tegangan *DC* konstan menjadi tegangan *DC* yang variabel sesuai dengan kebutuhan. *DC-DC converter* memiliki topologi rangkaian yang berbeda-beda. Setiap topologi memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing yang pemilihannya tergantung pada kebutuhan. Salah satu topologi dari *DC-DC converter* adalah *SEPIC Converter*. *SEPIC converter* merupakan konverter elektronika daya dengan masukan tegangan *DC* dan keluaran tegangan *DC* yang nilai tegangan keluarannya bisa lebih besar maupun lebih kecil dari tegangan sumbernya. *SEPIC converter* memiliki kesamaan dengan *buck boost converter*, dan *cuk converter*, hanya saja tegangan keluarannya tidak terjadi pembalikan polaritas. Karena kelebihan – kelebihan dari konverter ini, *SEPIC Converter* banyak diaplikasikan pada sistem tenaga listrik seperti sistem *photovoltaic*.

Pada penelitian ini, *SEPIC converter* akan disimulasikan menggunakan *sliding mode controller (SMC)* yang bertujuan untuk mendapatkan tegangan keluaran yang terkontrol dan respon yang lebih baik ketika diberi gangguan. Tiga gangguan yang diberikan antara lain: tegangan sumber, pembebanan, dan tegangan keluaran. Hasil yang diukur adalah waktu pemulihan dan deviasi tegangan dari respon tegangan keluaran, kemudian akan dibandingkan dengan pengendali PID yang merupakan pengendali yang sudah banyak digunakan untuk *SEPIC converter*. Simulasi akan dilakukan menggunakan *software MATLAB Simulink*.

Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah waktu pemulihan tegangan keluaran untuk mencapai kondisi *steady state* pada *SEPIC converter* lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan pengendali PID.

Kata Kunci : *SEPIC converter*, *SMC*, PID, deviasi tegangan, waktu pemulihan

SUMMARY

Alief Aulia Pradika Wijaya, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, June 2020, Sliding Mode Controller for Output Voltage Control in SEPIC Converter, Academic Supervisor : Rini Nur Hasanah and Lunde Ardhenta*

DC-DC converter is a series of power electronics used to regulate a constant DC voltage into a variable DC voltage according to need. DC-DC converters have different circuit topologies. Each topology has advantages and disadvantages of each whose choice depends on needs. One of the topologies of DC-DC converter is SEPIC Converter. SEPIC converter is a power electronics converter with input DC voltage and output DC voltage whose output voltage can be greater or smaller than the source voltage. SEPIC converter has similarities with buck boost converter, and cuk converter, it's just that the output voltage does not occur polarity reversal. Because of the advantages of this converter, SEPIC Converter is widely applied to electric power systems such as photovoltaic systems.

In this study, the SEPIC converter will be simulated using a sliding mode controller (SMC) which aims to get a controlled output voltage and better response when disturbed. Three disturbances are given including: source voltage, loading, and output voltage. The measured result is the recovery time and the voltage deviation of the output voltage response, then it will be compared with the PID controller which is a controller that has been widely used for SEPIC converters. Simulations will be performed using MATLAB Simulink software.

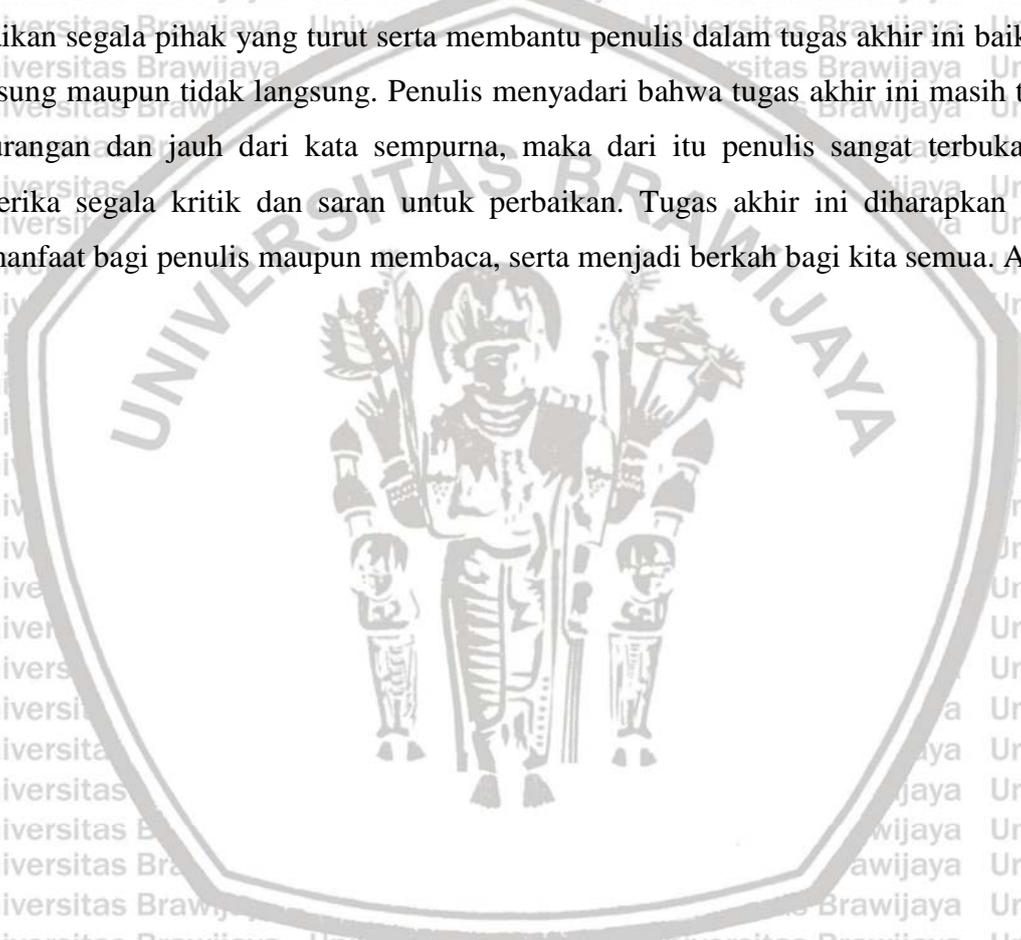
The expected result of this research is that the recovery time of the output voltage to achieve a steady state in the SEPIC converter is faster than using a PID controller.

Keywords: *SEPIC converter, SMC, PID, voltage deviation, recovery time*

9. Teman-teman Asisten Laboratorium Elektronika Daya angkatan 2015-2017, teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik 2016, dan teman-teman MOSFET 2016 atas segala dukungan dan motivasinya selama penulis di perkuliahan.

10. Teman-teman Al – Hadiid, Paduan Suara, dan teman – teman UKM yang selalu memberikan motivasi dan membuka jalan pikiran penulis dalam masalah akademik maupun non-akademik.

Semoga Allah SWT. yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang membalas segala kebaikan segala pihak yang turut serta membantu penulis dalam tugas akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna, maka dari itu penulis sangat terbuka dalam menerima segala kritik dan saran untuk perbaikan. Tugas akhir ini diharapkan mampu bermanfaat bagi penulis maupun membaca, serta menjadi berkah bagi kita semua. Aamiin



Malang, 3 Juni 2020

Penulis



DAFTAR ISI

Halaman

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI	i
RINGKASAN	iii
SUMMARY	v
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. DC-DC Converter	5
2.2. The Single-Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)	5
2.3. Model Matematik SEPIC Converter dengan Metode SSA (State Space Averaging)	12

2.4. <i>Sliding Mode Controller</i>	14
2.5. Analisis Tanggapan Peralihan.....	16
2.6. <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	18
2.7. Pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID)	18
2.8. Menentukan Parameter Pengendali	19
2.8.1 Identifikasi Sistem.....	20
2.8.2 Menentukan Model Sistem.....	20
2.8.3 Desain Pengendali PID.....	21
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Metode yang Digunakan	25
3.2 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	25
3.3 Diagram Alir	25
3.4 Menentukan Spesifikasi <i>SEPIC Converter</i>	26
3.5 Menghitung Parameter <i>SEPIC Converter</i>	26
3.6 Perancangan <i>SEPIC Converter</i>	26
3.7 Perancangan <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i>	27
3.8 Perancangan Pengendali PID	28
3.9 Simulasi dan Analisis Performa <i>SEPIC Converter</i>	29
3.9.1 Simulasi ketika Tegangan Masukan Berubah	30
3.9.2 Simulasi ketika Nilai Pembebanan Berubah	30
3.9.3 Simulasi ketika Tegangan Referensi Berubah	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Menentukan Spesifikasi <i>SEPIC Converter</i>	33
4.2. Menghitung Parameter <i>SEPIC converter</i>	34
4.2.1 Perhitungan Nilai <i>Duty Cycle</i>	34
4.2.2 Perhitungan Parameter Komponen <i>SEPIC converter</i>	34
4.3. Perancangan <i>SEPIC Converter</i>	35

4.4. Perancangan Sliding Mode Controller	38
4.4.1 Menentukan Referensi yang Digunakan	38
4.4.2 Menentukan Persamaan <i>Sliding Surface</i>	38
4.4.3 Menghitung Persamaan UEQ	38
4.4.4 Menghitung Persamaan UN	39
4.4.5 Menghitung Persamaan U	40
4.4.6 Desain <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i> pada <i>MATLAB Simulink</i>	41
4.5. Perancangan Pengendali PID	41
4.5.1 Pemodelan Sistem Orde Dua	42
4.5.2 Perhitungan Nilai <i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	43
4.5.3 Perhitungan Nilai KP, Ki, dan Kd	44
4.5.4 Desain Pengendali PID untuk <i>SEPIC Converter</i>	45
4.6. Simulasi dan Analisis Performa <i>SEPIC Converter</i>	46
4.6.1 Simulasi ketika Tegangan Masukan Berubah	47
4.6.2 Simulasi ketika Tegangan Pembebanan Berubah	52
4.6.3 Simulasi ketika Tegangan Referensi Berubah	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<i>Gambar 2.1</i> Rangkaian <i>SEPIC converter</i>	5
<i>Gambar 2.2</i> Rangkaian ekuivalen ketika saklar tertutup	6
<i>Gambar 2.3</i> Rangkaian ekuivalen ketika saklar terbuka.....	6
<i>Gambar 2.4</i> <i>Trajectories in the phase plane</i>	15
<i>Gambar 2.5</i> Respon <i>unit step</i> sistem orde dua	18
<i>Gambar 2.6</i> Diagram blok suatu pengendali proporsional integral derivatif (PID).....	19
<i>Gambar 2.7</i> Blok diagram <i>close loop</i> dengan pengendali PID	21
<i>Gambar 3.1</i> Diagram alir penelitian.....	25
<i>Gambar 3.2</i> Diagram alir perancangan <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i>	27
<i>Gambar 3.3</i> Diagram alir perancangan pengendali PID	28
<i>Gambar 4.1</i> Blok diagram <i>SEPIC converter</i> pada <i>MATLAB Simulink</i>	36
<i>Gambar 4.2</i> Tegangan keluaran <i>SEPIC converter</i> pada kondisi <i>open – loop</i>	37
<i>Gambar 4.3</i> Blok diagram <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i> pada <i>MATLAB Simulink</i>	41
<i>Gambar 4.4</i> Blok diagram pengendali PID pada <i>MATLAB Simulink</i>	45
<i>Gambar 4.5</i> Blok diagram <i>SEPIC converter</i> dengan <i>SMC</i> dan pengendali PID	46
<i>Gambar 4.6</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 10 V	48
<i>Gambar 4.7</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 15 V	49
<i>Gambar 4.8</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 25 V	50
<i>Gambar 4.9</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 30 V	50
<i>Gambar 4.10</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 24 V ..	51
<i>Gambar 4.11</i> Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 90 Ω	53
<i>Gambar 4.12</i> Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 100 Ω	54
<i>Gambar 4.13</i> Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 120 Ω	55
<i>Gambar 4.14</i> Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 130 Ω	55
<i>Gambar 4.15</i> Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 50 Ω	56
<i>Gambar 4.16</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 90 V ..	58
<i>Gambar 4.17</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 100 V	58
<i>Gambar 4.18</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 120 V	59
<i>Gambar 4.19</i> Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 130 V	60



DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 3.1 Format simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan masukan berubah..... 30

Tabel 3.2 Format simulasi *SEPIC converter* ketika nilai pembebanan berubah..... 30

Tabel 3.3 Format simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan referensi berubah..... 31

Tabel 4.1 Spesifikasi *SEPIC converter* 33

Tabel 4.2 Parameter komponen *SEPIC converter* yang digunakan 35

Tabel 4.3 Pemodelan sistem dan nilai *RMSE* dengan *duty cycle* berbeda..... 43

Tabel 4.4 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan masukan berubah..... 47

Tabel 4.5 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika pembebanan berubah 52

Tabel 4.6 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan referensi berubah..... 57



DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Tegangan keluaran SEPIC converter menggunakan SMC tanpa gangguan... 65

Lampiran 2. Tegangan keluaran SEPIC converter menggunakan pengendali PID tanpa gangguan..... 65

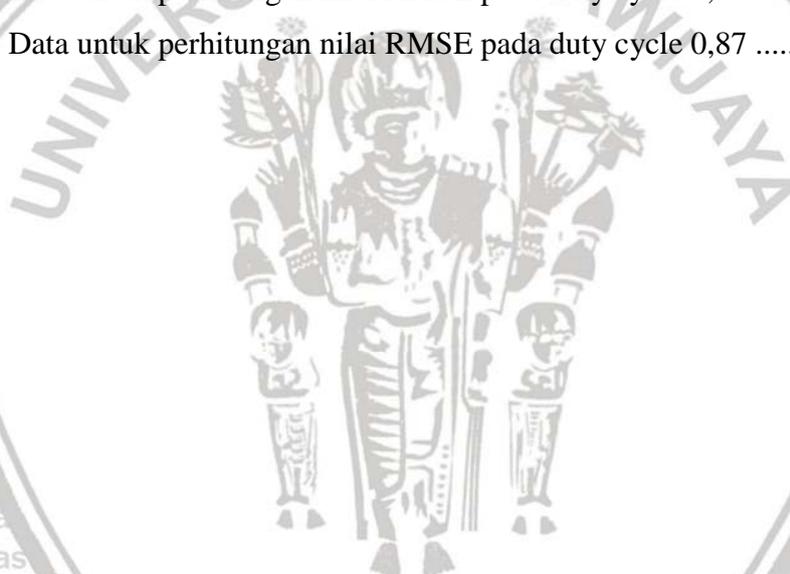
Lampiran 3. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,83 71

Lampiran 4. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,846 76

Lampiran 5. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,85 81

Lampiran 6. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,85 86

Lampiran 7. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,87 91



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi komponen dan rangkaian elektronika telah mampu menghasilkan sistem penyedia daya tegangan searah (*Direct Current/DC*) yang dihasilkan melalui konversi tegangan *DC* masukan ke bentuk tegangan *DC* keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah. Konversi tegangan *DC* ini biasa disebut sebagai *DC-DC converter* (Forsyth & Mollov, 1998). Penerapan *DC-DC converter* dalam perkembangannya telah memungkinkan suatu perangkat elektronika dapat berfungsi dengan menggunakan sumber energi baterai yang bertegangan kecil di mana tegangan keluarannya dapat diubah-ubah sesuai kebutuhan pemakaian (Noor, 2015).

DC-DC converter memiliki topologi rangkaian yang berbeda-beda. Setiap topologi memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing yang pemilihannya tergantung pada kebutuhan. Kelebihan dari sistem konversi ini adalah kemampuannya untuk menghasilkan tegangan keluaran konstan meskipun tegangan input berubah-ubah (Hren & Slibar, 2005). Topologi tersebut diantaranya adalah *buck converter* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan *DC*, *boost converter* untuk menaikkan tegangan *DC*, dan *buck-boost converter* untuk menaikkan dan menurunkan tegangan *DC*. *Buck-boost converter* sejauh ini telah dikembangkan menjadi *cuk converter*, *SEPIC converter*, dan *zeta converter*. Ketiga converter ini memiliki fungsi yang sama namun memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. *Buck-boost converter* dan *cuk converter* memiliki kelemahan yaitu polaritas keluaran yang terbalik dibandingkan masukannya. *SEPIC converter* adalah salah satu *DC-DC converter* yang spesial di mana konverter ini dapat mempertahankan keluaran konstan di bawah kondisi masukan yang bervariasi dan berubah-ubah, *ripple* arus masukan yang kecil, dan polaritas keluaran yang sama dengan masukannya. Oleh karena itu, *SEPIC converter* cocok digunakan pada sistem dengan tegangan masukan yang bervariasi dari tegangan nominalnya seperti pada sistem yang berbasis baterai, dan bidang pembangkitan berbasis *renewable energy* seperti *PV* (Paranthagan et al, 2015).

Agar tegangan keluaran lebih teregulasi atau mengurangi kekurangan *SEPIC converter* berupa memiliki *overshoot* yang cukup besar, waktu untuk mencapai kondisi *steady – state* yang cukup lama, dan terjadi osilasi pada tegangan keluarannya maka digunakanlah sebuah pengendali (*controller*). Pengendali yang digunakan pada penelitian ini adalah *Sliding Mode*

Controller (SMC) dan Proporsional-Integral-Derivatif (PID). *Sliding Mode Controller (SMC)* merupakan salah satu jenis *variable structure control system (VSCS)* yang termasuk dalam teknik kendali kokoh terutama untuk permasalahan kendali sistem nonlinier. *SMC* telah banyak diaplikasikan pada beberapa macam sistem, seperti *DC-DC converter*, *servo electro-hydraulic*, *magnetic levitation*, dan *robot manipulator* (Arbiyanti, 2007). Dalam aplikasi pemodelan, desain *SMC* menunjukkan kinerja yang baik untuk mendapatkan stabilitas dan performa yang konsisten (Slotine, 1991). Secara teoritis, *SMC* digunakan dalam desain teknik kendali untuk mengarahkan respon *trajectory* ke dalam *sliding surface (switching surface)* dan menjaganya sehingga pergerakannya stabil.

Pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID) adalah mekanisme umpan balik loop kontrol. Pengendali PID merupakan pengendali yang paling optimal diantara kombinasi P (Proporsional), I (Integral), dan D (Derivative) karena stabilitas yang tinggi dimana masing-masing pengendali saling menyempurnakan satu sama lain. Pengendali PID menghitung nilai kesalahan (*error*) sebagai perbedaan antara variabel proses yang diukur dan setpoint yang diinginkan. Pengendali berusaha meminimalkan kesalahan dengan menyesuaikan proses melalui penggunaan variabel yang dimanipulasi, nilai K_p , K_i , dan K_d dihitung untuk pengontrol PID.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap *SEPIC converter* dalam kondisi *open loop* dan menggunakan dua pengendali yang berbeda yaitu *SMC* dan pengendali PID. Pemilihan *Sliding Mode Controller* sebagai pengendali karena merupakan pengendali untuk mengatasi permasalahan sistem nonlinier seperti *SEPIC converter*. Hasil tegangan keluaran *SEPIC converter* menggunakan *SMC* akan dibandingkan dengan hasil tegangan keluaran *SEPIC converter* tanpa pengendali dan menggunakan pengendali PID yang merupakan pengendali yang cocok untuk sistem linier. Kemudian akan dianalisis dengan mengubah nilai beban, tegangan keluaran, dan tegangan referensi. Simulasi akan diterapkan pada program *MATLAB Simulink*.

1.2. Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang yang telah diuraikan di atas maka rumusan masalah untuk penelitian ini adalah :

1. Bagaimana merancang *SEPIC converter* pada software *MATLAB Simulink*.
2. Bagaimana merancang *Sliding Mode Controller (SMC)* untuk *SEPIC converter*.

3. Bagaimana merancang pengendali PID berdasarkan metode *direct synthesis* untuk *SEPIC converter*.
4. Bagaimana performa *SEPIC converter* menggunakan *Sliding Mode Controller (SMC)* dan pengendali PID.

1.3. Batasan Masalah

Pembahasan masalah pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Menggunakan rangkaian *SEPIC converter*.
2. Metode pengendalian yang digunakan yaitu *SMC* dan PID.
3. Parameter *SEPIC converter* bernilai tetap ketika diberi gangguan.
4. Menggunakan beban resistif.

1.4. Tujuan Penelitian

Merancang *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali PID menggunakan simulasi program *MATLAB Simulink* yang mampu meregulasi tegangan keluaran dengan baik sehingga mampu mempertahankan konstan tegangan keluaran meskipun terjadi perubahan tegangan masukan, nilai pembebanan dan tegangan referensi.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi penulis, mampu memberikan pembelajaran tentang cara meregulasi tegangan menggunakan *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali PID.
2. Bagi pembaca, mampu memberikan wawasan mengenai *SEPIC converter*, *SMC*, dan pengendali PID.
3. Bagi kalangan akademisi, diharapkan mampu digunakan sebagai rujukan untuk penelitian selanjutnya mengenai *DC-DC converter* dengan *SMC* dan pengendali PID.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah :

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Menguraikan tentang dasar teori yang mendukung terhadap penelitian yang akan dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini.

BAB III : METODE PENELITIAN

Menguraikan tentang metode dan langkah kerja yang terdiri dari studi literatur, pengambilan data, perhitungan dan analisis, serta pengambilan kesimpulan dan saran.

BAB IV : PEMBAHASAN

Menguraikan data-data yang diperlukan, dengan analisis terhadap masalah yang akan diajukan sehingga diperoleh hasil dalam penelitian ini.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Memuat kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang dilakukan.



BAB II

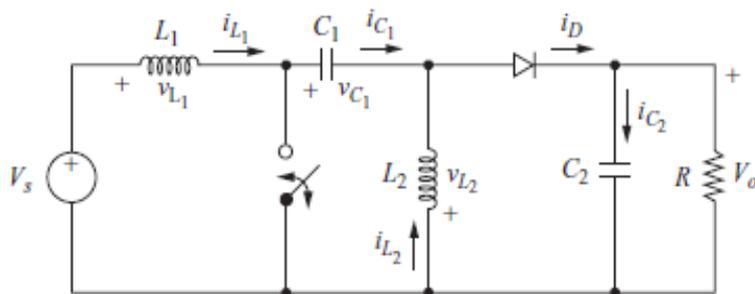
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. DC-DC Converter

DC-DC converter adalah rangkaian elektronika daya yang meregulasi tegangan *DC* konstan menjadi tegangan *DC* yang variabel sesuai dengan kebutuhan. Agar mendapatkan keluaran yang sesuai, digunakan teknik *switching* dengan cara mengatur *dutycycle* pada komponen pensaklaran elektronik *MOSFET* menggunakan metode *PWM (Pulse Width Modulation)*, *PFM (Pulse Frequency Modulation)* atau gabungan antara keduanya. (Hart, 2011: 196).

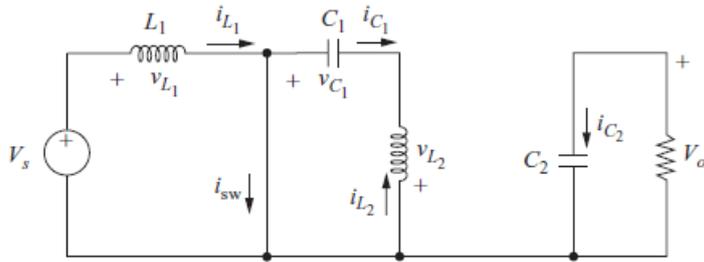
2.2. The Single-Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)

SEPIC converter merupakan salah satu dari jenis *DC-DC Converter*. *SEPIC converter* merupakan konverter elektronika daya dengan masukan tegangan *DC* dan keluaran tegangan *DC* yang nilai tegangan keluarannya bisa lebih besar maupun lebih kecil dari tegangan sumbernya. *SEPIC converter* memiliki kesamaan dengan *buck boost converter*, dan *cuk converter*, hanya saja tegangan keluarannya tidak terjadi pembalikan polaritas. Konverter ini termasuk konverter tipe peralihan (*switching*) yang bekerja dengan membuka dan menutup saklar elektronik. Konverter ini menggunakan 2 induktor, dioda, 2 kapasitor dan *MOSFET* atau *IGBT* yang berfungsi sebagai saklar elektronik. Rangkaian *SEPIC converter* ditunjukkan seperti Gambar 2.1.

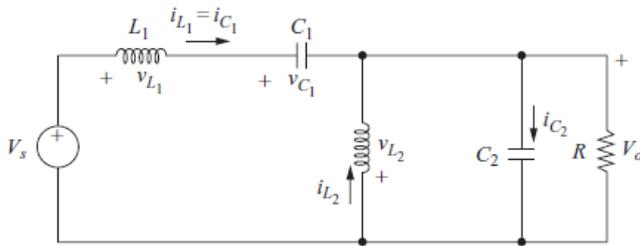


Gambar 2.1 Rangkaian *SEPIC converter*

Sumber : Hart (2011: 231)



Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen ketika saklar tertutup
 Sumber : Hart (2011: 231)



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen ketika saklar terbuka
 Sumber : Hart (2011: 231)

SEPIC converter memiliki dua kondisi pensaklaran, yaitu pada saat saklar tertutup (ON) dan saat saklar terbuka (OFF). Untuk mendapatkan persamaan kedua kondisi tersebut digunakan Kirchhoff's voltage law (KVL), dan Kirchhoff's current law (KCL). SEPIC converter pada kondisi saklar tertutup maka diode akan terbuka seperti pada Gambar 2.2 dan pada kondisi saklar terbuka diode akan terhubung seperti pada Gambar 2.3.

Pada analisis ketika saklar tertutup, sesuai dengan hukum tegangan Kirchhoff, diperoleh persamaan :

$$\sum V = 0$$

Karena $\sum V = -V_S + V_{L1}$, maka diperoleh,

$$-V_S + V_{L1} = 0$$

Karena $V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt}$, maka diperoleh,

$$-V_S + L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-1) ;

$$L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_S}{L_1} \dots \dots \dots (2-1)$$

Keterangan :



$V_S =$ Tegangan sumber (V)

$L_1 =$ Nilai induktor 1 (H)

Pada analisis ketika saklar tertutup, sesuai dengan hukum tegangan *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum V = 0$$

Karena $\sum V = V_{L2} - V_{C1}$, maka diperoleh,

$$V_{L2} - V_{C1} = 0$$

Karena $V_{L2} = L_2 \frac{dI_{L2}}{dt}$, maka diperoleh,

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} - V_{C1} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-2) ;

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L_2} \dots \dots \dots (2-2)$$

Keterangan :

$V_{C1} =$ Tegangan pada kapasitor 1 (V)

$L_2 =$ Nilai induktor 2 (H)

Pada analisis ketika saklar tertutup, sesuai dengan hukum arus *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum I = 0$$

Karena $\sum I = I_{C1} + I_{L2}$, maka diperoleh,

$$I_{C1} + I_{L2} = 0$$

Karena $I_{C1} = C_1 \frac{dV_{C1}}{dt}$, maka diperoleh,

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} + I_{L2} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-3) :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = - \frac{I_{L2}}{C_1} \dots \dots \dots (2-3)$$

Keterangan :

$I_{L2} =$ Arus pada induktor 2 (A)

$C_1 =$ Nilai kapasitor 1 (F)

Pada analisis ketika saklar tertutup, sesuai dengan hukum arus *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum I = 0$$



Karena $\sum I = I_{C2} + I_O$, maka diperoleh,

$$I_{C2} + I_O = 0$$

Karena $I_{C2} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt}$ dan $I_O = \frac{V_{C2}}{R}$, maka diperoleh,

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \frac{V_{C2}}{R} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-4) :

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{RC_2} \dots \dots \dots (2-4)$$

Keterangan :

V_{C2} = Tegangan pada kapasitor 2 (V)

C_2 = Nilai kapasitor 2 (F)

R = Nilai beban/resistansi (Ω)

Melalui model dinamik yang telah ditentukan dari *SEPIC converter* melalui *Kirchhoff's voltage law (KVL)*, dan *Kirchhoff's current law (KCL)* saat kondisi saklar tertutup dari persamaan (2-1), (2-2), (2-3), dan (2-4) maka diperoleh persamaan matriks (2-5) :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_S] \dots \dots \dots (2-5)$$

Pada analisis ketika saklar terbuka, sesuai dengan hukum tegangan *Kirchhoff*, diperoleh persamaan :

$$\sum V = 0$$

Karena $\sum V = -V_S + V_{L1} + V_{C1} + V_{C2}$, maka diperoleh,

$$-V_S + V_{L1} + V_{C1} + V_{C2} = 0$$

Karena $V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt}$, maka diperoleh,

$$-V_S + L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} + V_{C1} + V_{C2} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-6) :

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_S}{L_1} - \frac{V_{C1}}{L_1} - \frac{V_{C2}}{L_1} \dots \dots \dots (2-6)$$



Keterangan :

V_{C1} = Tegangan pada kapasitor 1 (V)

V_{C2} = Tegangan pada kapasitor 2 (V)

V_S = Tegangan sumber (V)

L_1 = Nilai induktor 1 (H)

Pada analisis ketika saklar terbuka, sesuai dengan hukum tegangan *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum V = 0$$

Karena $\sum V = V_{L2} + V_{C2}$, maka diperoleh,

$$V_{L2} + V_{C2} = 0$$

Karena $V_{L2} = L_2 \frac{dI_{L2}}{dt}$, maka diperoleh,

$$L_2 \frac{dI_{L2}}{dt} = -V_{C2}$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-7) ;

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{L_2} \dots \dots \dots (2-7)$$

Keterangan :

V_{C2} = Tegangan pada kapasitor 2 (V)

L_2 = Nilai induktor 2 (H)

Pada analisis ketika saklar terbuka, sesuai dengan hukum arus *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum I = 0$$

Karena $\sum I = I_{C1} + I_{L2}$, maka diperoleh,

$$I_{C1} + I_{L2} = 0$$

Karena $I_{C1} = C_1 \frac{dV_{C1}}{dt}$, maka diperoleh,

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = -I_{L2}$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-8) ;

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{I_{L2}}{C_1} \dots \dots \dots (2-8)$$

Keterangan :

I_{L2} = Arus pada induktor 2 (A)

C_1 = Nilai kapasitor 1 (F)



Pada analisis ketika saklar terbuka, sesuai dengan hukum arus *Kirchhoff*, diperoleh

persamaan :

$$\sum I = 0$$

Karena $\sum I = I_{C2} - I_{L1} - I_{L2} + I_O$, maka diperoleh,

$$I_{C2} - I_{L1} - I_{L2} + I_O = 0$$

Karena $I_{C2} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt}$ dan $I_O = \frac{V_{C2}}{R}$, maka diperoleh,

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} - I_{L1} - I_{L2} + \frac{V_{C2}}{R} = 0$$

Dari penurunan persamaan di atas diperoleh persamaan (2-9) ;

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{I_{L1}}{C_2} + \frac{I_{L2}}{C_2} - \frac{V_{C2}}{RC_2} \dots \dots \dots (2-9)$$

Keterangan :

I_{L1} = Arus pada induktor 1 (A)

I_{L2} = Arus pada induktor 2 (A)

V_{C2} = Tegangan pada kapasitor 2 (V)

R = Nilai beban/resistansi (Ω)

C_2 = Nilai kapasitor 2 (F)

Melalui model dinamik yang telah ditentukan dari *SEPIC converter* melalui *Kirchhoff's voltage law (KVL)*, dan *Kirchhoff's current law (KCL)* saat kondisi saklar terbuka dari persamaan (2-6), (2-7), (2-8), dan (2-9) maka diperoleh persamaan matriks (2-10):

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_s] \dots \dots \dots (2-10)$$

Untuk menghitung tegangan keluaran dari *SEPIC converter* dengan D adalah *duty cycle* dirumuskan dengan persamaan (2-11) :

$$V_o = V_s \left(\frac{D}{1-D} \right) \dots \dots \dots (2-11)$$

Jadi nilai *duty cycle* pada *SEPIC converter* dapat dinyatakan dengan persamaan (2-12) :

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_s} \dots \dots \dots (2-12)$$

Keterangan :



V_o = Tegangan keluaran (V)

V_s = Tegangan Sumber (V)

Hasil ini mirip dengan persamaan *buck boost* dan *cuk converter* dengan perbedaan penting bahwa tidak ada pembalikan polaritas antara input dan output tegangan.

Kemampuan untuk memiliki tegangan output lebih besar atau lebih kecil dari input tanpa pembalikan polaritas membuat konverter ini cocok untuk banyak aplikasi (Hart, 2011).

Untuk menghitung nilai minimum induktor 1, induktor 2 dan *ripple* arus induktor pada *SEPIC converter* dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$L_2 = L_1 = \frac{V_s D}{\Delta I_L f} \tag{2-13}$$

Oleh karena itu, ΔI_L diperoleh pada persamaan (2-14) :

$$\Delta I_L = \frac{V_s D T}{L} = \frac{V_s D}{L f} \tag{2-14}$$

Keterangan :

L_1 = Nilai induktor 1 (H)

L_2 = Nilai induktor 2 (H)

V_s = Tegangan Sumber (V)

f = frekuensi pensaklaran (kHz)

ΔI_L = *Ripple* arus induktor (A)

D = *Duty Cycle* (%)

Kemudian untuk menghitung nilai minimum kapasitor 1, kapasitor 2, dan *ripple* tegangan kapasitor pada *SEPIC converter* dapat dirumuskan dengan persamaan (2-15) :

$$C_1 = C_2 = \frac{D}{R(\Delta V_c/V_o)f} \tag{2-15}$$

Oleh karena itu, ΔV_c diperoleh pada persamaan (2-16) :

$$\Delta V_c = \frac{V_o D}{RCf} \tag{2-16}$$

Keterangan :

C_1 = Nilai kapasitor 1 (F)

C_2 = Nilai kapasitor 2 (F)

R = Nilai beban atau resistansi (Ω)

ΔV_c = *Ripple* tegangan pada kapasitor (V)

D = *Duty Cycle* (%)

f = Frekuensi pensaklaran (kHz)



2.3. Model Matematik SEPIC Converter dengan Metode SSA (State Space Averaging)

Pemodelan matematika dibutuhkan untuk menganalisis karakteristik dari SEPIC converter. Karakteristik tersebut dapat digunakan untuk mendesain pengendali yang sesuai.

Metode SSA (State Space Averaging) banyak digunakan sebagai model matematika untuk mendesain pengendali untuk konverter (Kircioglu et al, 2016:2).

Setelah diperoleh persamaan dari kondisi saklar ON dan OFF, dengan menggunakan metode SSA, perubahan arus induktor dan perubahan tegangan pada kapasitor dapat diketahui dengan persamaan (2-17) dan (2-18).

$$\dot{X} = AX + BU \dots \dots \dots (2-17)$$

$$V_o = CX \dots \dots \dots (2-18)$$

Keterangan :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{bmatrix} \quad A = DA_{ON} + (1 - D)A_{OFF} \quad B = DB_{ON} + (1 - D)B_{OFF}$$

Dengan menggunakan matriks pada persamaan (2-5), dan (2-10) yaitu pada saat kondisi saklar ON dan OFF maka diperoleh persamaan (2-19) :

$$\dot{X} = [DA_{ON} + (1 - D)A_{OFF}]X + [DB_{ON} + (1 - D)B_{OFF}]U \dots \dots \dots (2-19)$$

Pertama, menghitung matriks A dalam persamaan (2-19) terlebih dahulu,

$$A = D \cdot A_{ON} + (1 - D)A_{OFF}$$

Substitusikan nilai A_{ON} dari persamaan (2-5) dan A_{OFF} dari persamaan (2-10),

$$A = D \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} + (1 - D) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix}$$

Oleh karena itu, diperoleh persamaan matriks A :



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{(1-D)}{L_1} & -\frac{(1-D)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{(1-D)}{L_2} \\ \frac{(1-D)}{C_1} & \frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{(1-D)}{C_2} & \frac{(1-D)}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix}$$

Selanjutnya menghitung matriks B,

$$B = DB_{ON} + (1-D)B_{OFF}$$

Substitusikan nilai B_{ON} dari persamaan (2-5) dan B_{OFF} dari persamaan (2-10),

$$B = D \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + (1-D) \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Setelah menemukan persamaan matriks A, dan B, maka, dari persamaan (2-19) akan diperoleh persamaan (2-20) :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{(1-D)}{L_1} & -\frac{(1-D)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{(1-D)}{L_2} \\ \frac{(1-D)}{C_1} & -\frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{(1-D)}{C_2} & \frac{(1-D)}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_S] \dots \dots (2-20)$$

Setelah dihitung menggunakan persamaan matriks menggunakan metode SSA, maka diperoleh hasil akhir dari model dinamik *SEPIC converter* yaitu pada persamaan (2-20), persamaan tersebut akan digunakan untuk merancang rangkaian *SEPIC converter* pada *MATLAB Simulink*.

Kemudian menghitung persamaan matriks dari tegangan keluaran pada persamaan (2-21):

$$V_o = [0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} \dots \dots (2-21)$$



Sebelum menerapkan rangkaian *SEPIC converter* pada *MATLAB*, untuk mempermudah perancangan, persamaan (2-20) tersebut diubah dalam bentuk persamaan (2-22), (2-23), (2-24), dan (2-25) :

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = -\frac{(1-D)(V_{C1} + V_{C2})}{L_1} + \frac{V_S}{L_1} \dots \dots \dots (2-22)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{DV_{C1}}{L_2} - \frac{(1-D)V_{C2}}{L_2} \dots \dots \dots (2-23)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{(1-D)I_{L1}}{C_1} - \frac{DI_{L2}}{C_1} \dots \dots \dots (2-24)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{(1-D)(I_{L1} + I_{L2})}{C_2} - \frac{V_{C2}}{RC_2} \dots \dots \dots (2-25)$$

2.4. Sliding Mode Controller

Sliding Mode Control (SMC) adalah metode kontrol non-linier yang mengubah dinamika sistem dengan menerapkan sinyal kontrol yang tidak kontinu sehingga memaksa sistem untuk berseluncur sepanjang bagian silang dari perilaku normal sistem (Vijay, 2016: 3). *Sliding surface* (permukaan geser) dipilih sedemikian rupa sehingga lintasan sistem atau respon sistem di dekat permukaan diarahkan ke permukaan geser (*S*) itu sendiri sesuai dengan referensi baik itu berupa tegangan maupun arus. Kontroler variabel memberikan respon transien yang cepat bersamaan dengan pelacakan jalur sinyal referensi tertentu untuk mencapai respon dinamik yang diinginkan. Jika kondisi tersebut terpenuhi, status sistem bergerak dari nilai awal menuju *sliding surface* (Chong Tan, 2008:5).

Sliding Surface berupa sinyal *error*, dari sinyal keluaran dengan sinyal referensi atau *set point*. Referensi pada *Sliding Surface* dapat menggunakan arus, tegangan dan daya, namun pada kenyataannya arus dan daya sulit di kontrol sehingga referensi yang sering digunakan adalah arus yang ditunjukkan pada persamaan (2-26) (Chong Tan, 2008:4).

$$S = K_1 e_1 + K_2 e_2 + \dots + K_N e_N \dots \dots \dots (2-26)$$

K adalah konstanta yang didapatkan dengan cara *trial and error*, sedangkan *e* adalah nilai error baik itu berupa arus, tegangan, maupun daya.

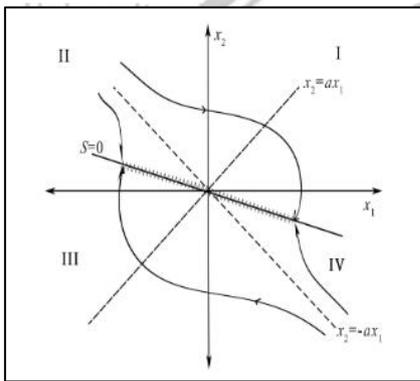
Pada *DC-DC converter*, *sliding surface* digunakan untuk menentukan *duty cycle* berdasarkan persamaan (2-27) (Pandey, 2016:3).

$$U = U_{EQ} + U_N \dots \dots \dots (2-27)$$



U_{EQ} didesain untuk menjaga parameter yang diketahui. Persamaan U_{EQ} didapatkan dengan cara menurunkan persamaan *sliding surface*. U_N didesain untuk mengatasi gangguan yang terjadi. Persamaan U_N didapatkan dengan menggunakan teori kestabilan Lyapunov (Pandey, 2016:3).

Pada *Sliding Mode Control (SMC)* terdapat tiga mode yaitu *Reaching Mode (RM)*, *Sliding Mode (SM)* dan *Steady State Mode (SSM)* (Naik, 2018:12). Pada Mode *RM*, lintasan tertarik ke permukaan geser *hyperlane*, *hyperlane* adalah suatu garis yang memisahkan antara dua buah kelompok, pada kondisi tersebut *hyperlane* memisahkan antara kondisi di atas permukaan geser dan di bawah permukaan geser yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Trajectories in the phase plane
 Sumber : Naik (2018:12)

Persamaan U_N diperoleh dari teori kestabilan sistem Lyapunov pada persamaan (2-28 dan 2-29) (Naik, 2018:12).

$$V = \frac{1}{2} S^2 \tag{2-28}$$

$$\dot{V} = S\dot{S} \tag{2-29}$$

Pada persamaan diatas, dapat dilihat bahwa kondisi yang tepenuhi untuk menentukan *RM* dapat diperoleh dengan cara menentukan hubungan antara S dan turunan dari S atau \dot{S} . Tercapainya suatu kondisi pada *Sliding Mode Control* terjadi jika kondisi *RM* pada persamaan (2-30) terpenuhi (Naik, 2018:12).

$$S\dot{S} < 0 \tag{2-30}$$

Secara umum, *Sliding Mode Control* konvensional pada *DC-DC converter* dapat didefisikan pada persamaan (2-31) (Naik, 2018:12).



$$U_N = ksign(S) \dots \dots \dots (2-31)$$

2.5. Analisis Tanggapan Peralihan

Untuk menganalisis suatu sistem maka hal yang harus diketahui pertama adalah respon dari sistem tersebut. Dengan melihat respon awal dari sistem tersebut maka kita akan dapat mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady – state* (tunak) dan besarnya nilai *error*.

Sistem Orde Dua

Pada sistem orde dua, bentuk umum fungsi alihnya pada persamaan (2-32) :

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} \dots \dots \dots (2-32)$$

Keterangan :

ξ = Rasio peredaman sistem (*damping ratio*)

ω_n = Frekuensi natural/alamiah tak teredam

Nilai K pada persamaan (2-33) adalah penguatan sistem

$$K = \frac{V_{oss}}{U} \dots \dots \dots (2-33)$$

Dengan :

V_{oss} = tegangan *steady – state*

U = duty cycle

Perilaku dinamik sistem orde dua dapat digambarkan dalam suku dua parameter ξ dan ω_n . Jika ($0 < \xi < 1$), sistem dikatakan dalam peredaman dan tanggapan peralihan berosilasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Jika ($\xi = 1$), maka sistem dikatakan teredam kritis. Sistem terlalu teredam berhubungan dengan ($\xi > 1$). Tanggapan peralihan sistem teredam kritis dan sistem terlalu teredam tidak berosilasi. Jika($\xi = 0$), tanggapan peralihan tidak muncul.

Berdasarkan respon sistem dengan masukan unit step akan terdapat tiga keadaan yang berbeda yaitu keadaan kurang teredam ($0 < \xi < 1$), teredam kritis ($\xi = 1$), dan sistem terlalu teredam ($\xi > 1$).

1. Keadaan Kurang Teredam / Underdamped ($0 < \xi < 1$)
2. Teredam Kritis / Critically Damped ($\xi = 1$)
3. Terlalu Teredam / Overdamped ($\xi > 1$) (Yudaningtias, 2017).



Berdasarkan respon sistem dengan masukan unit step akan terdapat tiga keadaan yang berbeda yaitu keadaan kurang teredam ($0 < \xi < 1$), teredam kritis ($\xi = 1$), dan sistem terlalu teredam ($\xi > 1$). Tanggapan peralihan sistem kontrol terhadap masukan unit step pada umumnya dikelompokkan sebagai berikut

1. Delay Time / Waktu Tunda, t_d

Waktu yang dibutuhkan oleh respons untuk mencapai setengah harga akhir pada saat lonjakan pertama.

2. Rise Time / Waktu Naik, t_r

Waktu yang dibutuhkan oleh respons agar bertambah dari 10% menjadi 90% dari nilai akhir.

3. Peak Time / Waktu Puncak, t_p

Waktu yang dibutuhkan oleh respons untuk mencapai puncak pertama lonjakan (maksimum). Dapat dirumuskan pada persamaan (2-34):

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \dots \dots \dots (2-34)$$

4. Maximum Overshoot / Lonjakan Maksimum, M_p

Merupakan nilai puncak kurva respons diukur dari satu dirumuskan pada persamaan (2-35).

$$M_p = \frac{V_p - V_{OSS}}{V_{OSS}} \times 100\% \dots \dots \dots (2-35)$$

Keterangan :

V_p = nilai respons pada saat lonjakan maksimum.

V_{OSS} = nilai respons pada saat keadaan mantap.

5. Settling Time / Waktu Turun, t_s

Waktu yang dibutuhkan oleh respons untuk mencapai harga tertentu dan tetap dalam range nilai akhir. Ada dua kriteria untuk menentukan waktu turun yaitu :

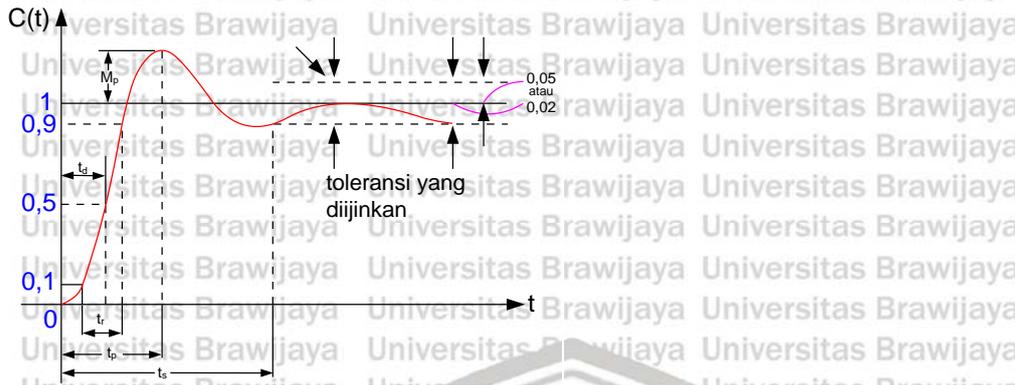
Untuk kriteria 2% :

$$t_s(\pm 2\%) = 4\tau^* \dots \dots \dots (2-36)$$

Untuk kriteria 5% :

$$t_s(\pm 5\%) = 3\tau^* \dots \dots \dots (2-37)$$





Gambar 2.5 Respon unit step sistem orde dua

Sumber : Yudaningtyas (2017: 46)

2.6. Root Mean Square Error (RMSE)

Setelah memodelkan sistem, langkah selanjutnya adalah menghitung *RMSE*. *RMSE* adalah sebuah metode yang digunakan untuk menghitung nilai *error* terkecil dari suatu sistem dengan beberapa jumlah data. Metode ini merupakan langkah awal untuk mendesain pengendali PID. Dengan mengetahui nilai *error* terkecil, maka dapat dicari pemodelan sistem orde dua yang akan digunakan untuk mendapatkan parameter kontroler PID. Rumus untuk menghitung *RMSE* pada persamaan (2-38):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2} \dots \dots \dots (2-38)$$

Keterangan :

- e_i = $y_i - y_{mi}$
- y_i = Nilai aktual (*plant*)
- y_{mi} = Nilai pemodelan
- N = Jumlah data

Setelah didapatkan nilai *RMSE*, maka langkah selanjutnya adalah membuat desain dari pengendali PID.

2.7. Pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID)

Gabungan antara pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali diferensial mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing dari tiga pengendali tersebut. Persamaan pengendali ini didefinisikan pada persamaan (2-39) :



$$u(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \dots \dots \dots (2-39)$$

Keterangan:

$u(t)$ = sinyal kontrol

$e(t)$ = sinyal error

K_p = penguatan proporsional

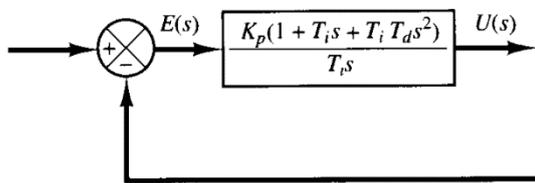
T_i = waktu turunan

T_d = waktu diferensial

Jika dalam bentuk fungsi alih maka persamaannya adalah pada persamaan (2-40)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \dots \dots \dots (2-40)$$

Dimana K_p menyatakan kepekaan proporsional, T_d menyatakan waktu turunan, dan T_i menyatakan waktu integral. Diagram blok pengendali PID ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram blok suatu pengendali proporsional integral derivatif (PID)
 Sumber : Ogata (2010 : 218)

2.8. Menentukan Parameter Pengendali

Ada tiga cara dalam menentukan parameter PID diantaranya adalah dengan metode *tunning* yaitu Ziegler Nichols, Cohen Coon, dsb. Metode kestabilan yaitu melalui *root locus*, dan bode, kemudian dengan metode analitik yang berbasis model matematis, pada penelitian ini akan digunakan metode analitik agar dapat dimodelkan dalam *MATLAB Simulink*.

Pada penentuan parameter PID dengan metode analitik terdapat tiga langkah yaitu:

1. Identifikasi sistem
2. Menentukan model sistem



3. Desain pengendali PID

2.8.1 Identifikasi Sistem

Langkah pertama adalah identifikasi sistem, *SEPIC converter* merupakan sistem orde empat karena menggunakan dua induktor dan dua kapasitor, oleh karena itu, untuk mempermudah memodelkan sistem tersebut kita perlu menggunakan pendekatan sistem orde satu atau sistem orde dua tergantung respon keluaran sistem pada saat kondisi *open loop*.

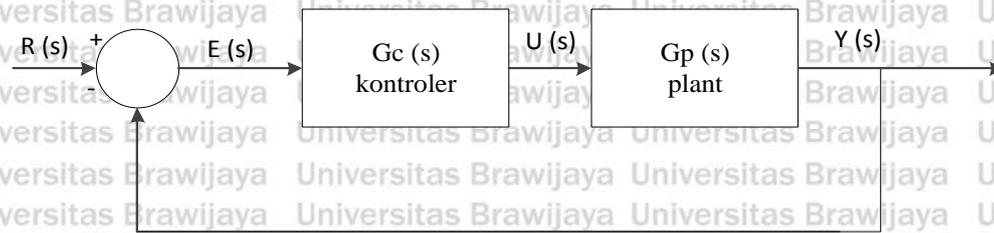
2.8.2 Menentukan Model Sistem

Setelah dilakukan identifikasi sistem, untuk modelkan sistem *SEPIC converter* pertama kita perlu memasukkan sinyal uji pada plant yaitu *SEPIC converter* kemudian melihat *output breakpoint*-nya atau bisa disebut dengan kondisi *open loop*. Karena output dari kondisi *open loop* pada *SEPIC converter* lebih mendekati respon sistem orde dua maka pada pemodelan ini digunakan pendekatan dari orde empat menjadi orde dua. Dalam memodelkan sistem orde dua kita akan mencari parameter-parameter orde dua berdasarkan kondisi *open loop SEPIC converter*. Parameter-parameter itu diantaranya adalah K (penguatan), ξ (rasio redamaman sistem), dan ω_n (frekuensi natural). Untuk mendapatkan parameter tersebut dimulai dari mencari nilai penguatan terlebih dahulu seperti pada persamaan (2-33). Setelah ditemukan nilai penguatan maka selanjutnya adalah mencari nilai tegangan puncak pada persamaan (2-35). Dengan mendapatkan nilai $\%M_p$ maka parameter ξ dapat diperoleh menggunakan persamaan (2-41) :

$$\%M_p = e^{-\left(\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \dots \dots \dots (2-41)$$

Untuk mencari parameter ω_n , kita harus mengetahui waktu ketika terjadi tegangan puncak (t_p) melalui respon keluaran kondisi *open loop SEPIC converter*. Ketika nilai tegangan puncak diketahui selanjutnya adalah memasukkan nilai tersebut dalam persamaan (2-34). Saat semua nilai parameter didapatkan, parameter tersebut kita masukkan ke dalam persamaan sistem orde dua pada persamaan (2-32).

2.8.3 Desain Pengendali PID



Gambar 2.7 Blok diagram *close loop* dengan pengendali PID

Sumber : Ogata (2010 : 218)

Transfer function dari blok diagram tersebut ditunjukkan pada persamaan (2-42)

$$Y(s) = G_C(s).G_P(s).E(s)$$

Karena $E(s) = R(s) - Y(s)$, maka diperoleh,

$$Y(s) = G_C(s).G_P(s).(R(s) - Y(s))$$

$$Y(s) = G_C(s).G_P(s).R(s) - G_C(s).G_P(s).Y(s)$$

$$(1 + G_C(s).G_P(s)).Y(s) = G_C(s).G_P(s).R(s)$$

$$Closeloop\ TF \rightarrow \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s).G_P(s)}{1 + G_C(s).G_P(s)} \quad (2-42)$$

Keterangan :

$Y(s)$ = Respon keluaran sistem

$E(s)$ = Sinyal *error*

$U(s)$ = Sinyal kontrol

$G_C(s)$ = Kontroler

$R(s)$ = Nilai referensi yang diinginkan

$G_P(s)$ = *Plant*

Untuk persamaan pada plant sesuai pada Gambar 2.7 dapat dirumuskan dalam persamaan (2-43) :



$$Plant \rightarrow G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} \dots\dots\dots (2-43)$$

Untuk persamaan pada parameter PID sesuai pada Gambar 2.7 dapat dirumuskan dalam persamaan (2-44):

$$\begin{aligned}
 \text{Pengendali PID} \rightarrow G_C(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i S} + \tau_d S \right) \\
 G_C(s) &= \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(\frac{\tau_i \tau_d S^2 + \tau_i S + 1}{\tau_i S} \right) \dots\dots\dots (2-44)
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2-42), (2-43), dan (2-44) dapat dilakukan penurunan sehingga diperoleh persamaan (2-45) :

$$\begin{aligned}
 \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{G_C(s)G_p(s)}{1 + G_C(s)G_p(s)} \\
 \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{K_p \left(\frac{\tau_i \tau_d S^2 + \tau_i S + 1}{\tau_i S} \right) \left(\frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} \right)}{1 + K_p \left(\frac{\tau_i \tau_d S^2 + \tau_i S + 1}{\tau_i S} \right) \left(\frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} \right)} \\
 \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{\frac{K_p \cdot K}{\tau_i S}}{1 + \frac{K_p \cdot K}{\tau_i S}} = \frac{\frac{K_p \cdot K}{\tau_i S}}{\frac{K_p \cdot K + \tau_i S}{\tau_i S}} = \frac{K_p \cdot K}{K_p \cdot K + \tau_i S} = \frac{1}{\frac{\tau_i S}{K_p \cdot K} + 1} \\
 \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{K^*}{\tau^* S + 1} \dots\dots\dots (2-45)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

K^* = Konstanta (umumnya nilainya 1 jika $(s) = R(s)$)

τ^* = *Settling time* yang diinginkan (s)

Setelah mendapatkan persamaan (2-45), selanjutnya menentukan nilai *settling time* pada persamaan (2-36), dan (2-37) tergantung berapa nilai toleransi yang kita



inginkan, kemudian setelah ditentukan nilai *settling time* kita bisa mendapatkan parameter PID yaitu K_p , K_i , dan K_d sesuai pada persamaan (2-48), (2-49), dan (2-50).

$$\tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (2-46)$$

$$\tau_i \cdot \tau_d = \frac{1}{\omega_n^2} \rightarrow \tau_d = \frac{1}{\omega_n^2 \cdot \tau_i} \quad (2-47)$$

$$\tau^* = \frac{\tau_i}{K_p \cdot K} \rightarrow K_p = \frac{\tau_i}{\tau^* \cdot K} \quad (2-48)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (2-49)$$

$$K_d = K_p \cdot \tau_d \quad (2-50)$$

Setelah didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d tersebut kita bisa mengaplikasikan pengendali PID pada *SEPIC converter* menggunakan program *MATLAB Simulink*.





BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode yang Digunakan

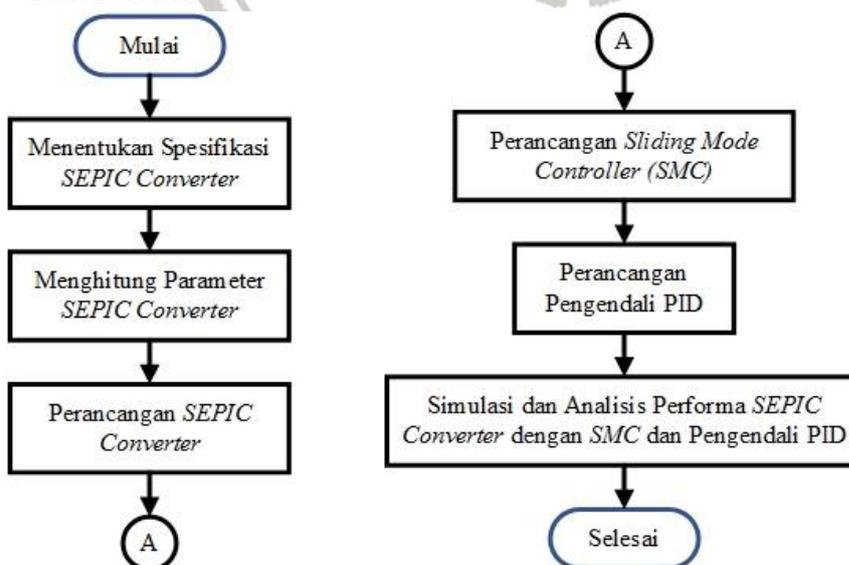
Penelitian ini akan menggunakan *sliding mode control* dan pengendali PID untuk mengatur tegangan keluaran *SEPIC converter*. Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan software *MATLAB Simulink*. Pada simulasi akan diberikan gangguan berupa perubahan tegangan masukan, nilai pembebanan, dan tegangan referensi pada sistem. Hasil tegangan keluaran akan dianalisis dan dibandingkan satu sama lain dengan memperhatikan waktu sistem kembali ke keadaan *steady – state* (t_{rec}) dan selisih tegangan maksimal dengan *steady – state* ketika diberi gangguan (ΔV).

3.2 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari 2020 hingga Maret 2020. Penelitian dilakukan di Laboratorium Elektronika Daya Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.3 Diagram Alir

Pada metode penelitian ini, terdapat diagram alir yang digunakan untuk menggambarkan langkah-langkah kerja dalam melakukan penelitian. Diagram alir ini dapat mempermudah untuk mengetahui langkah- langkah yang akan dilakukan dalam penelitian. Diagram alir ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian
 Sumber : Penulis



Diagram alir pada Gambar 3.1 menjelaskan tentang langkah – langkah yang akan dilakukan dalam melakukan penelitian. Langkah yang pertama adalah menentukan spesifikasi dari *SEPIC converter*. Kemudian melakukan perhitungan nilai parameter *SEPIC converter* yang akan digunakan pada penelitian ini. Setelah menghitung nilai parameter, *SEPIC converter* dapat dirancang dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink* dan dilihat hasil keluaran *open loop*-nya. Langkah selanjutnya adalah merancang 2 pengendali yaitu *Sliding Mode Controller (SMC)* dan PID untuk *SEPIC converter*. Setelah melakukan perancangan, *SEPIC converter* dengan kedua pengendali dapat disimulasikan dan dibandingkan hasil keluarannya dengan memberi gangguan terhadap sistem berupa perubahan tegangan masukan, nilai pembebanan, dan tegangan referensi. Simulasi dilakukan dengan *software MATLAB Simulink*.

3.4 Menentukan Spesifikasi *SEPIC Converter*

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1, langkah pertama yang harus dilakukan yaitu menentukan spesifikasi *SEPIC converter*. Spesifikasi yang ditentukan adalah nilai tegangan masukan (V_S), tegangan keluaran (V_O), frekuensi pensaklaran (f), beban resistor (R), ripple arus induktor 1 (ΔI_{L1}), ripple arus induktor 2 (ΔI_{L2}), ripple tegangan kapasitor 1 (ΔV_{C1}), dan ripple tegangan kapasitor 2 (ΔV_{C2}). Penentuan spesifikasi *SEPIC converter* ini bertujuan untuk mempermudah perhitungan nilai parameter pada langkah selanjutnya.

3.5 Menghitung Parameter *SEPIC Converter*

Setelah menentukan spesifikasi *SEPIC converter*, langkah selanjutnya adalah menentukan parameter konverter. Parameter yang dihitung adalah nilai *duty cycle* (D) sesuai dengan persamaan (2-12), komponen induktor 1 (L_1) dan 2 (L_2) sesuai dengan persamaan (2-13), komponen kapasitor 1 (C_1) dan 2 (C_2) sesuai dengan persamaan (2-15). Perhitungan parameter bertujuan untuk mengetahui nilai (D), (L_1), (L_2), (C_1), dan (C_2) yang sesuai dengan spesifikasi *SEPIC converter*.

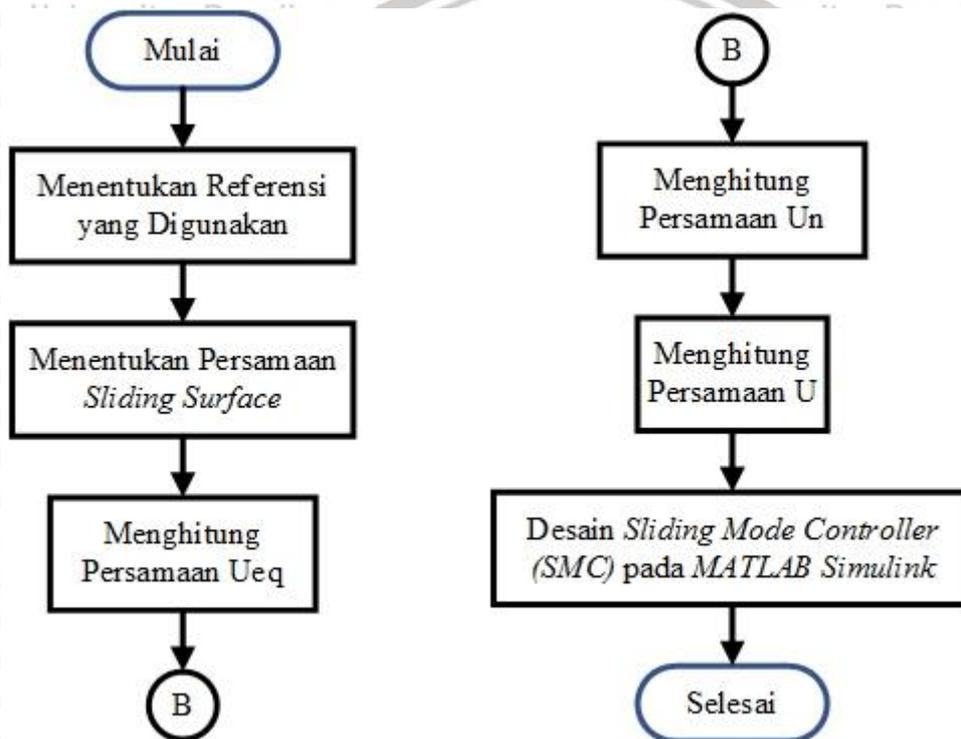
3.6 Perancangan *SEPIC Converter*

Setelah menghitung parameter *SEPIC Converter*, langkah selanjutnya adalah merancang *SEPIC converter*. *SEPIC Converter* akan dirancang pada *software MATLAB Simulink*. Perancangan konverter mengacu pada persamaan *state – space SEPIC converter* pada persamaan (2-22), (2-23), (2-24), dan (2-25). Persamaan tersebut akan dimodelkan dalam bentuk blok diagram. Pemodelan juga memperhatikan spesifikasi dan parameter *SEPIC converter* yang telah ditentukan dan dihitung pada langkah – langkah sebelumnya.

Kemudian model *SEPIC converter* ini akan dilihat hasil keluaran *open loop*-nya. Hasil keluaran ini nantinya akan digunakan untuk merancang kedua pengendali yang akan digunakan.

3.7 Perancangan *Sliding Mode Controller (SMC)*

Setelah merancang *SEPIC converter*, langkah selanjutnya yaitu merancang pengendali yang akan digunakan, yang pertama adalah *Sliding Mode Controller (SMC)*. Berikut ini merupakan diagram alir perancangan *Sliding Mode Controller (SMC)* pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir perancangan *Sliding Mode Controller (SMC)*
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 3.2 dijelaskan langkah – langkah dalam merancang *SMC*. Langkah pertama adalah menentukan referensi yang akan digunakan. Referensi ini bisa berupa arus induktor 1 (I_{L1}), arus induktor 2 (I_{L2}), tegangan kapasitor 1 (V_{C1}), tegangan kapasitor 2 (V_{C2}), ataupun daya keluaran sistem (P_o).

Langkah selanjutnya adalah menentukan persamaan *sliding surface* yang akan digunakan. Penentuan persamaan *sliding surface* dengan bentuk umum pada persamaan (2-26) harus memperhatikan persamaan *state – space* dari *SEPIC converter* pada persamaan (2-22), (2-23), (2-24), dan (2-25).

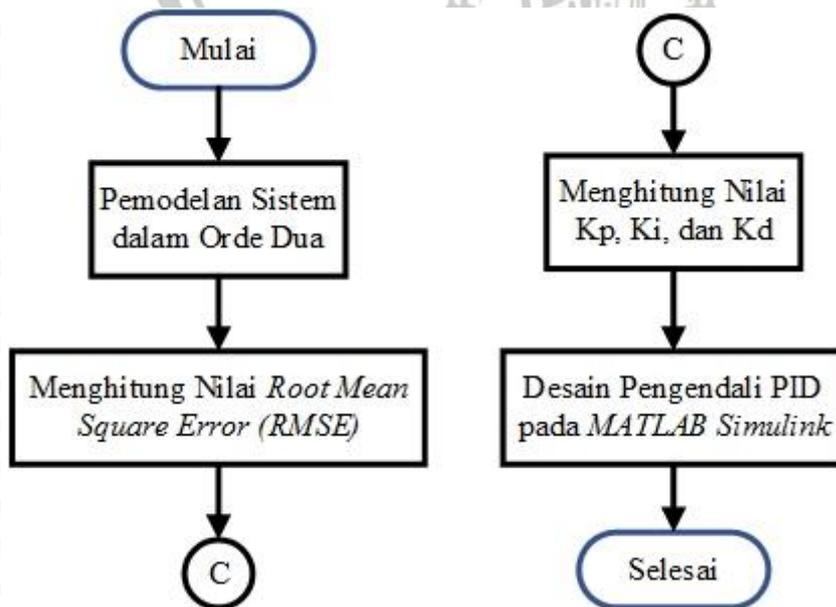
Setelah mendapatkan persamaan *sliding surface*, selanjutnya adalah menghitung persamaan U_{EQ} . Untuk menghitung persamaan U_{EQ} , persamaan *sliding surface* pada persamaan (2-26) diturunkan. Setelah dapat hasil penurunannya, persamaan tersebut sama dengan 0 kemudian dilakukan modifikasi matematis sehingga mendapatkan persamaan U_{EQ} .

Setelah mendapatkan persamaan U_{EQ} , langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan U_N . Perhitungan persamaan U_N mengacu pada persamaan *Lyapunov* yaitu persamaan (2-28) dan (2-29). Dari persamaan ini, dimasukkan persamaan *sliding surface* yang sudah ditentukan sebelumnya kemudian dilakukan modifikasi matematis sehingga mendapatkan persamaan U_N . Perhitungan nilai U_N harus memenuhi syarat pada persamaan (2-30).

Setelah mendapatkan persamaan U_{EQ} dan U_N , langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan U . Persamaan tersebut dapat dihitung melalui persamaan (2-27). Nilai U ini akan digunakan untuk mengganti nilai *duty cycle* (D) pada *SEPIC converter* dalam kondisi *open loop*. Setelah persamaan U didapatkan, *Sliding Mode Controller* (*SMC*) dapat dimodelkan dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink*.

3.8 Perancangan Pengendali PID

Pengendali yang kedua adalah pengendali PID. Berikut ini merupakan diagram alir perancangan pengendali PID pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alir perancangan pengendali PID

Sumber : Penulis



SEPIC converter merupakan *plant* orde empat, sehingga untuk memudahkan dalam mendesain pengendali kita melakukan pendekatan dengan memodelkan sistem dari orde empat menjadi orde dua. Pada sistem orde dua, parameter yang dibutuhkan diantaranya adalah K (penguatan), ξ (rasio redamaman sistem), dan ω_n (frekuensi natural). Dengan melihat keluaran *open loop* dari konverter, maka nilai K (penguatan), bisa ditentukan sesuai dengan persamaan (2-33). Kemudian ξ (rasio peredaman sistem) diketahui dari tegangan puncak pada kondisi *open loop* dengan persamaan (2-42). Parameter yang terakhir yang dicari yaitu ω_n (frekuensi natural). Untuk mendapatkan nilai frekuensi natural, waktu puncak dari sistem pada kondisi *open loop* harus diketahui terlebih dahulu. Setelah mengetahui nilai waktu puncak, maka nilai frekuensi natural sistem dapat dicari dengan persamaan (2-34). Kemudian dari ketiga parameter tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (2-32) untuk mendapatkan fungsi alih sistem orde dua.

Setelah melakukan pemodelan sistem, selanjutnya mencari nilai *error* terkecil dari pemodelan sistem. Untuk mendapatkan nilai *error* terkecil dari pemodelan dapat dihitung dengan metode *RMSE (Root Mean Square Error)*. Pada penelitian ini terdapat 5 *duty cycle* yang digunakan untuk pemodelan sistem dan memilih satu pemodelan dengan nilai *error* terkecil.

Setelah mendapatkan pemodelan yang sesuai, langkah selanjutnya ada menghitung nilai K_p , K_i , dan K_d . Untuk melakukan perhitungan, sebelumnya harus dibuat model matematika dari *plant* dan juga kontroler secara umum sesuai dengan persamaan (2-42). Selanjutnya mensubstitusi persamaan (2-43) dan (2-44) ke dalam persamaan (2-42) sehingga diperoleh persamaan (2-45). Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai *settling time* pada persamaan (2-36) dan (2-37). Nilai *settling time* ini digunakan untuk mendapatkan parameter PID yaitu K_p , K_i , dan K_d sesuai pada persamaan (2-48), (2-49), dan (2-50). Nilai – nilai tersebut disubstitusikan ke persamaan (2-39) sehingga didapatkan nilai *duty cycle (D)* dari pengendali PID. Langkah selanjutnya adalah mendesain pengendali PID untuk *SEPIC converter* pada *software MATLAB Simulink* dalam model blok diagram sehingga *SEPIC converter* dapat disimulasikan.

3.9 Simulasi dan Analisis Performa *SEPIC Converter*

Langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dan analisis performa *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali PID. Untuk mengetahui tingkat keberhasilan dari *plant* dan pengendali dalam menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan yang dibutuhkan

oleh beban serta mengetahui ketahanan dari pengendali, maka simulasi yang akan dilaksanakan diantaranya :

1. Simulasi ketika tegangan masukan berubah
2. Simulasi ketika nilai pembebanan berubah
3. Simulasi ketika tegangan referensi berubah

3.9.1 Simulasi ketika Tegangan Masukan Berubah

Pada simulasi yang pertama ini tegangan masukan dari konverter diubah-ubah dengan menaikkan atau menurunkan tegangan masukan, sedangkan tegangan referensi dan beban dibuat konstan. Format hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Format simulasi SEPIC converter ketika tegangan masukan berubah

No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)
1							
2							
3							
4							
5							

Pada simulasi dengan perubahan tegangan masukan pada tabel di atas, akan dilihat hasil keluaran SEPIC converter dengan SMC dan pengendali PID. Parameter yang dilihat adalah waktu sistem kembali ke keadaan steady – state (t_{rec}) dan selisih tegangan maksimal dengan steady – state ketika diberi gangguan (ΔV).

3.9.2 Simulasi ketika Nilai Pembebanan Berubah

Pada simulasi yang kedua ini pembebanan dari konverter diubah-ubah dengan menaikkan atau menurunkan beban, sedangkan tegangan referensi dan tegangan masukan dibuat konstan. Format hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.2 dibawah ini.

Tabel 3.2 Format simulasi SEPIC converter ketika nilai pembebanan berubah

No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)

1						
2						
3						
4						
5						

Pada simulasi dengan perubahan nilai pembebanan pada tabel di atas, akan dilihat hasil keluaran *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali *PID*. Parameter yang dilihat adalah waktu sistem kembali ke keadaan *steady – state* (t_{rec}) dan selisih tegangan maksimal dengan *steady – state* ketika diberi gangguan (ΔV).

3.9.3 Simulasi ketika Tegangan Referensi Berubah

Pada simulasi yang ketiga ini tegangan referensi dari konverter diubah-ubah baik dengan menaikkan atau menurunkan tegangan referensi, sedangkan tegangan masukan dan beban dibuat konstan. Format pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Format simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan referensi berubah

No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)
1							
2							
3							
4							
5							

Pada simulasi dengan perubahan tegangan referensi pada tabel di atas, akan dilihat hasil keluaran *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali *PID*. Parameter yang dilihat adalah waktu sistem kembali ke keadaan *steady – state* (t_{rec}) dan selisih tegangan maksimal dengan *steady – state* ketika diberi gangguan (ΔV).





BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Menentukan Spesifikasi *SEPIC Converter*

Untuk mendesain *SEPIC converter*, spesifikasi *SEPIC converter* harus ditentukan terlebih dahulu agar dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Spesifikasi *SEPIC converter* yang ditentukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi *SEPIC converter*

No	Parameter	Nilai
1	V_s (Tegangan masukan)	20 V DC
2	V_o (Tegangan keluaran)	110 V DC
3	f (Frekuensi pensaklaran)	50 kHz
4	R (Beban resistor)	110 Ω
5	Δi_{L1} (<i>Ripple</i> arus induktor 1)	0,05 A
6	Δi_{L2} (<i>Ripple</i> arus induktor 2)	0,05 A
7	ΔV_{C1} (<i>Ripple</i> tegangan kapasitor 1)	1 V
8	ΔV_{C2} (<i>Ripple</i> tegangan kapasitor 2)	1 V

Tabel 4.1 merupakan spesifikasi dari *SEPIC converter* yang ditentukan pada penelitian ini. Nilai tegangan masukan (V_s), tegangan keluaran (V_o), dan beban resistor (R) sebesar 20 V DC, 110 V DC, dan 110 Ω disesuaikan dengan pengaplikasian *SEPIC converter* pada sistem *photovoltaic* (Poornima, 2017). Saklar semikonduktor daya *MOSFET* yang digunakan dengan frekuensi pensaklaran (f) sebesar 50 kHz sesuai dengan ketersediaan di pasaran. Nilai *ripple* arus induktor 1 (Δi_{L1}), *ripple* arus induktor 2 (Δi_{L2}), *ripple* tegangan kapasitor 1 (ΔV_{C1}), dan *ripple* tegangan kapasitor 2 (ΔV_{C2}) berturut – turut ditentukan sebesar 0,05 A, 0,05 A, 1 V, 1 V sebagai asumsi bahwa nilai *ripple* arus dan tegangan pada

sistem sebesar nilai tersebut. Dari spesifikasi *SEPIC converter* yang telah ditentukan, nilai parameter *SEPIC converter* seperti induktor, kapasitor, dan *duty cycle* dapat dihitung.

4.2. Menghitung Parameter *SEPIC converter*

Setelah mendapatkan spesifikasi *SEPIC converter*, selanjutnya adalah menghitung nilai parameter dari *SEPIC converter*. Nilai parameter yang dihitung antara lain : nilai *duty cycle* (D), nilai komponen induktor 1 dan 2 (L_1 dan L_2), nilai komponen kapasitor 1 dan 2 (C_1 dan C_2).

4.2.1 Perhitungan Nilai *Duty Cycle*

Duty cycle pada konverter berguna untuk mengendalikan *gate* MOSFET/switch. Perubahan nilai *duty cycle* sangat berpengaruh terhadap tegangan keluaran yang dihasilkan. Nilai *duty cycle* didapatkan dengan menggunakan persamaan (2-12). Dengan memasukkan nilai dari V_o dan V_s sesuai spesifikasi ke persamaan (2-12) maka didapatkan *duty cycle* sebesar 0,846. Untuk perhitungan nilai *duty cycle* ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_s} = \frac{110}{110+20} = 0,846$$

Keterangan :

V_o = Tegangan keluaran (V)

V_s = Tegangan masukan (V)

D = *Duty cycle*

4.2.2 Perhitungan Parameter Komponen *SEPIC converter*

Parameter komponen konverter yang akan dihitung yaitu kapasitor dan induktor.

Pada *SEPIC converter* terdapat 2 induktor dan 2 kapasitor. Untuk menghitung nilai minimum induktor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-13). Perhitungan nilai minimum induktor ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$L_2 = L_1 = \frac{V_s D}{\Delta I_L f}$$

$$L_1 = \frac{V_s D}{\Delta I_L f} = \frac{20 \cdot 0,846}{0,05 \cdot 50000} = 6,77mH$$

$$L_2 = \frac{V_s D}{\Delta I_L f} = \frac{20 \cdot 0,846}{0,05 \cdot 50000} = 6,77mH$$

Komponen kedua adalah kapasitor. Nilai minimum kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (2-15). Perhitungan nilai minimum kapasitor ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$C_1 = C_2 = \frac{D}{R(\Delta V_c/V_o)f}$$

$$C_1 = \frac{D}{R(\Delta V_c/V_o)f} = \frac{0,846}{110(1/110)50000} = 16,92\mu F$$

$$C_2 = \frac{D}{R(\Delta V_c/V_o)f} = \frac{0,846}{110(1/110)50000} = 16,92\mu F$$

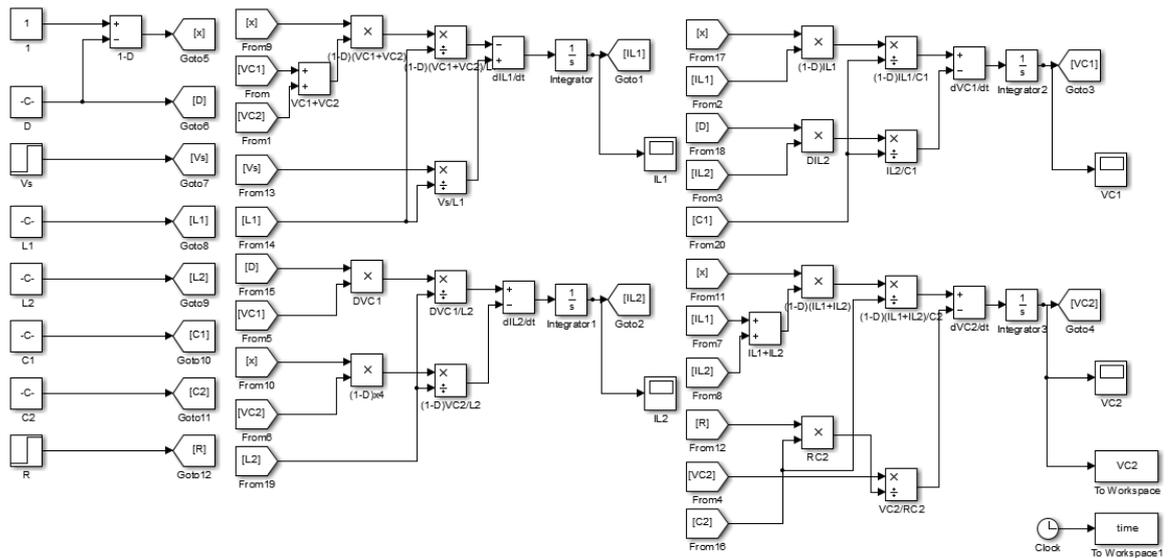
Setelah didapatkan nilai minimum dari induktor dan kapasitor maka komponen yang akan digunakan harus di atas nilai minimum, agar didapatkan kondisi *CCM* (*continuous conduction mode*). Pemilihan nilai komponen tersebut harus sesuai dengan nilai yang ada di pasaran yang nilainya harus lebih besar dari nilai minimal yang didapatkan. Parameter komponen konverter yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter komponen *SEPIC converter* yang digunakan

No	Simbol	Parameter	Nilai
1	L1=L2	Induktansi pada induktor 1 & 2	10 mH
2	C1=C2	Kapasitansi pada kapasitor 1 & 2	22 μ F

4.3. Perancangan *SEPIC Converter*

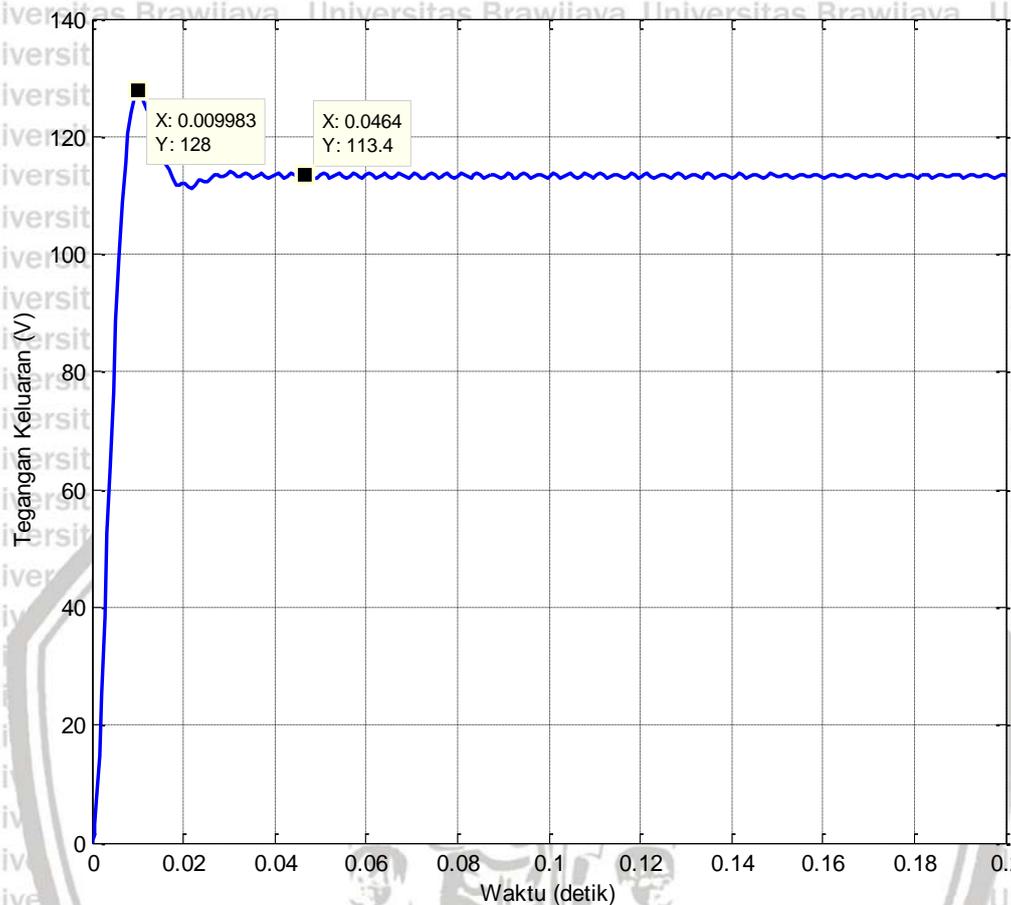
Setelah menentukan spesifikasi dan menghitung parameter *SEPIC converter*, langkah selanjutnya adalah merancang *SEPIC converter*. Perancangan *SEPIC converter* menggunakan *software MATLAB Simulink* yang dimodelkan dalam bentuk blok – blok diagram. Pemodelan blok – blok diagram mengacu pada persamaan *state – space SEPIC converter* pada persamaan (2-22, 2-23, 2-24, dan 2-25). Persamaan tersebut dihubungkan satu sama lain hingga membentuk susunan blok – blok diagram seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Blok diagram SEPIC converter pada MATLAB Simulink

Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.1 terdapat 7 blok masukan yaitu *duty cycle* (D), tegangan masukan (V_s), induktor 1 dan 2 (L_1 dan L_2), kapasitor 1 dan 2 (C_1 dan C_2), dan beban resistor (R) yang diperoleh dari spesifikasi dan hasil perhitungan parameter *SEPIC converter*. Nilai masukan tersebut disubstitusikan ke persamaan *state – space SEPIC converter* pada persamaan (2-22, 2-23, 2-24, dan 2-25) sehingga diperoleh 4 keluaran berupa arus induktor 1 (I_{L1}), arus induktor 2 (I_{L2}), tegangan kapasitor 1 (V_{C1}), dan tegangan kapasitor 2 (V_{C2}) atau tegangan keluaran *SEPIC converter* (V_o). Hasil keluaran tegangan keluaran akan ditampilkan dalam blok *scope* untuk dilihat hasilnya dan dijadikan acuan untuk langkah selanjutnya. Hasil tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open loop* terdapat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open – loop*
Sumber : Penulis

Gambar 4.2 merupakan tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open loop* dengan *duty cycle* (D) sebesar 0,85. Pemilihan nilai *duty cycle* sebesar 0,85 (D) akan dijelaskan pada subbab 4.5. Pada grafik terlihat bahwa tegangan puncak (V_p) sebesar 128 V pada waktu (t_p) 0,009983 detik. Grafik mencapai tegangan *steady – state* (V_{Oss}) sebesar 113,4 V pada waktu 0,0464.

Dari hasil tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open loop* dapat disimpulkan bahwa hasil tegangan keluaran *SEPIC converter* memiliki nilai *overshoot* sebesar 18 V dan tegangan keluaran saat kondisi *steady – state* kurang stabil atau masih mengalami osilasi. Untuk mengurangi kekurangan – kekurangan tersebut, diperlukan adanya pengendali. Selain itu, pengendali juga berguna untuk mengatasi permasalahan

tegangan keluaran ketika sistem diberi gangguan. Pengendali yang digunakan pada penelitian ini adalah *Sliding Mode Controller* dan pengendali PID.

4.4. Perancangan Sliding Mode Controller

4.4.1 Menentukan Referensi yang Digunakan

Penentuan referensi yang digunakan mengacu pada persamaan *state – space SEPIC converter* pada persamaan (2-22, 2-23, 2-24, dan 2-25). Pada penelitian ini, arus induktor 1 (I_{L1}) digunakan sebagai referensi. Pemilihan ini didasarkan pada adanya parameter *duty cycle* (D) dan tegangan keluaran V_O atau tegangan referensi V_{REF} pada persamaan (2-22). Penentuan referensi ini nantinya akan digunakan untuk menentukan persamaan *sliding surface*. Adapun persamaan I_{L1}^* (nilai referensi arus induktor 1) menurut (Pandey et al, 2016: 3) adalah :

$$I_{L1}^* = \frac{V_{REF}^2}{RV_S}$$

4.4.2 Menentukan Persamaan Sliding Surface

Penentuan persamaan *sliding surface* dilakukan setelah penentuan referensi yang akan digunakan untuk merancang *Sliding Mode Controller (SMC)*. Karena referensi yang digunakan pada penelitian ini adalah arus induktor 1 maka persamaan *sliding surface* yang digunakan berdasarkan persamaan (2-26) adalah :

$$S = K_1 e_1 + K_2 e_2 + \dots + K_N e_N$$

$$S = I_{L1} - I_{L1}^*$$

Dengan :

$$I_{L1} = \text{arus induktor riil}$$

$$I_{L1}^* = \text{arus induktor referensi}$$

4.4.3 Menghitung Persamaan U_{EQ}

Setelah persamaan *sliding surface* sudah ditentukan, maka persamaan U_{EQ} dapat dihitung. Perhitungan persamaan U_{EQ} dilakukan dengan cara menurunkan persamaan *sliding surface* sehingga persamaannya menjadi seperti persamaan berikut :

$$S = I_{L1} - I_{L1}^*$$

$$\dot{S} = \frac{dI_{L1}}{dt}$$

Karena $\dot{S} = 0$, maka persamaan menjadi sebagai berikut :

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = 0$$

Substitusikan persamaan (2-22) ke persamaan *sliding surface*, maka persamaan menjadi sebagai berikut :

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = -\frac{(1-D)(V_{C1} + V_{C2})}{L_1} + \frac{V_S}{L_1} = 0$$

Persamaan di atas disederhanakan sehingga diperoleh persamaan D yang nantinya akan digunakan sebagai U_{EQ} . Nilai $V_{C2} = V_{REF}$ (Pandey et al, 2016: 3). Maka persamaan menjadi sebagai berikut :

$$D = 1 - \frac{V_S}{V_{C1} + V_{REF}}$$

Maka diperoleh persamaan U_{EQ} sebagai berikut :

$$U_{EQ} = 1 - \frac{V_S}{V_{C1} + V_{REF}}$$

4.4.4 Menghitung Persamaan U_N

Setelah menghitung persamaan U_{EQ} , langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan U_N . Perhitungan persamaan U_N dilakukan dengan mengacu pada persamaan *Lyapunov* pada persamaan (2-28 dan 2-29).

$$\dot{V} = S\dot{S}$$

Substitusikan persamaan turunan *sliding surface* \dot{S} sehingga persamaan menjadi sebagai berikut :

$$\dot{V} = S \cdot \left(-\frac{(1-D)(V_{C1} + V_{C2})}{L_1} + \frac{V_S}{L_1} \right)$$

Selanjutnya nilai *duty cycle* D diganti dengan penjumlahan nilai U_{EQ} dan U_N sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\dot{V} = S \cdot \left(-\frac{(1 - (U_{EQ} + U_N))(V_{C1} + V_{C2})}{L_1} + \frac{V_S}{L_1} \right)$$



Substitusikan persamaan U_{EQ} sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\dot{V} = S \cdot \left(- \frac{\left(1 - \left(\left(1 - \frac{V_S}{V_{C1} + V_{REF}} \right) + U_N \right) (V_{C1} + V_{C2}) \right)}{L_1} + \frac{V_S}{L_1} \right)$$

Persamaan di atas dimodifikasi dan disederhanakan sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\dot{V} = S \cdot \left(\frac{U_N (V_{C1} + V_{C2})}{L_1} \right)$$

Agar memenuhi syarat pada persamaan (2-30) maka persamaan menjadi sebagai berikut :

$$S\dot{S} < 0$$

$$S \cdot \left(\frac{U_N (V_{C1} + V_{C2})}{L_1} \right) < 0$$

Maka persamaan U_N agar dapat memenuhi syarat pada persamaan (2-30) adalah :

$$U_N = - \frac{L_1}{V_{C1} + V_{C2}}$$

Berdasarkan persamaan umum U_N pada persamaan (2-31) maka diperoleh persamaan U_N sebagai berikut :

$$U_N = \left(- \frac{L_1}{V_{C1} + V_{C2}} \right) \text{sign}(S)$$

Nilai $V_{C2} = V_{REF}$ (Pandey et al, 2016: 3). Maka persamaan menjadi,

$$U_N = \left(- \frac{L_1}{V_{C1} + V_{REF}} \right) \text{sign}(S)$$

4.4.5 Menghitung Persamaan U

Setelah diperoleh persamaan U_{EQ} dan U_N , langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan U dari *Sliding Mode Controller (SMC)*. Persamaan ini nantinya akan digunakan sebagai *duty cycle* untuk *SEPIC converter*. Perhitungan persamaan U mengacu pada persamaan (2-26).



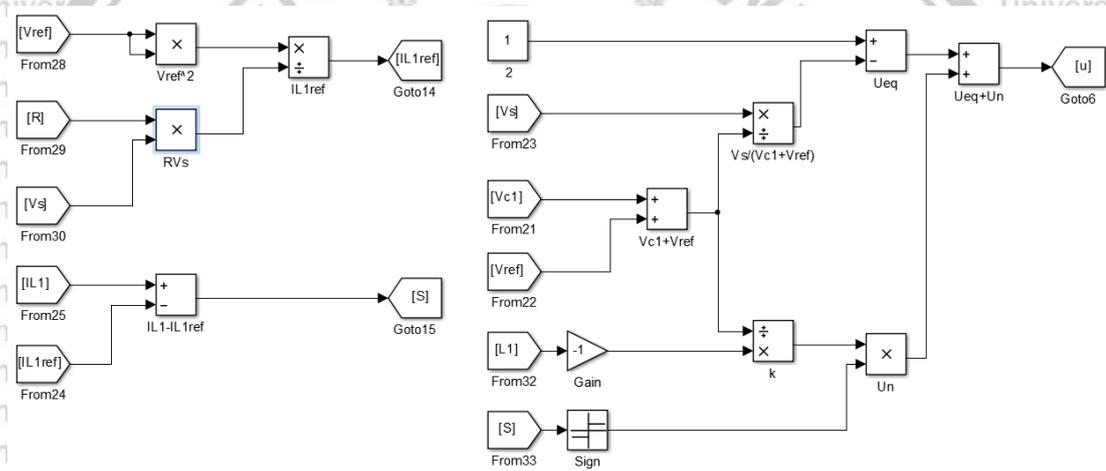
$$U = U_{EQ} + U_N$$

Dengan mensubstitusikan persamaan U_{EQ} dan U_N , maka diperoleh persamaan U sebagai berikut :

$$U = 1 - \frac{V_S}{V_{C1} + V_{REF}} + \left(-\frac{L_1}{V_{C1} + V_{REF}} \right) \text{sign}(S)$$

4.4.6 Desain Sliding Mode Controller (SMC) pada MATLAB Simulink

Langkah terakhir adalah mendesain *Sliding Mode Controller (SMC)* dalam bentuk blok – blok diagram pada *software MATLAB Simulink*. Gambar blok – blok diagram *Sliding Mode Controller (SMC)* dengan *plant* berupa *SEPIC converter* terdapat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Blok diagram *Sliding Mode Controller (SMC)* pada *MATLAB Simulink*

Sumber : Penulis

Gambar 4.3 merupakan pemodelan *Sliding Mode Controller (SMC)* pada persamaan U yang telah dihitung sebelumnya menjadi blok – blok diagram pada *software MATLAB Simulink*. Blok – blok diagram di atas disesuaikan dengan blok – blok diagram pada Gambar 4.1 pada blok V_{REF} , R , V_S , dan I_{L1} . Hasil keluaran pengendali pada blok U nantinya akan menggantikan nilai *duty cycle (D)* pada *SEPIC converter*.

4.5. Perancangan Pengendali PID

Parameter yang akan didapatkan pada pengendali PID yaitu nilai K_P , K_I , dan K_d . Nilai – nilai ini nantinya akan dihitung menjadi nilai *duty cycle (D)* untuk *SEPIC converter*.



4.5.1 Pemodelan Sistem Orde Dua

Langkah pertama untuk memodelkan sistem orde dua akan dilakukan menggunakan 5 *duty cycle* yang berbeda. Cara ini dilakukan agar mendapatkan nilai *error* yang terkecil sehingga diperoleh desain pengendali PID yang lebih presisi. *Duty cycle* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 0,83; 0,846; 0,85; 0,86; dan 0,87. Dari 5 pemodelan sistem, hanya satu perhitungan yang akan digunakan yaitu pemodelan dengan nilai *RMSE* (*root mean square error*) terkecil. Nilai *RMSE* terkecil diperoleh dari *duty cycle* 0,85 sesuai pada Tabel 4.3. Untuk memodelkan sistem menggunakan *duty cycle* 0,85 harus diketahui terlebih dahulu respon keluaran kondisi *open loop* dari *SEPIC converter* menggunakan *duty cycle* 0,85. Respon *open loop* dengan menggunakan *duty cycle* 0,85 didapatkan dengan mengubah nilai *duty cycle* (*D*) menjadi 0,85 pada Gambar 4.2.

Gambar 4.2 menunjukkan nilai dari tegangan puncak (V_p) yaitu 128 V, waktu puncak (t_p) yaitu 0,009996 detik, dengan tegangan keluaran *steady-state* (V_{OSS}) yaitu sekitar 113,4 V. Dengan memasukkan nilai dari (V_{OSS}) dan *duty cycle* (*D*) ke persamaan (2-33) maka diperoleh nilai penguatan dari sistem (*K*) yaitu 133,4118. Perhitungan nilai penguatan dari sistem (*K*) ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$K = \frac{V_{OSS}}{U} = \frac{113,4}{0,85} = 133,4118$$

Setelah mendapatkan nilai penguatan sistem maka selanjutnya yaitu menghitung nilai dari lonjakan maksimum (M_p) menggunakan persamaan (2-35):

$$\%M_p = \frac{V_p - V_{OSS}}{V_{OSS}} = \frac{128 - 113,4}{113,4} = 0,128748$$

Setelah didapatkan nilai dari lonjakan maksimum tersebut maka dapat dihitung nilai dari rasio peredaman sistem (ξ), menggunakan persamaan (2-49). Dengan memasukkan nilai dari $\%M_p = 0,128748$, maka nilai dari ξ yaitu :

$$0,128748 = e^{-\left(\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)}$$

$$\ln(0,128748) = \ln\left(e^{-\left(\frac{\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)}\right)$$

$$-2,049898 = -\frac{3,14 \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\xi = 0,546656$$

Setelah didapatkan nilai dari rasio peredaman sistem, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai frekuensi natural sistem (ω_n). Sesuai Gambar 4.2, diketahui nilai dari waktu puncak (t_p) yaitu 0,009983 detik, maka nilai dari frekuensi natural dapat dihitung dengan persamaan (2-34). Dengan memasukkan nilai $t_p = 0,009983$ detik ke dalam persamaan (2-34), maka perhitungan nilai dari ω_n adalah :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$0,009983 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}}$$

$$0,009983 = \frac{3,14}{\omega_n \sqrt{1 - 0,546656^2}}$$

$$\omega_n = 375,053$$

Setelah mendapatkan nilai K (penguatan), ξ (rasio redaman sistem), dan ω_n (frekuensi natural). Nilai - nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (2-40) yang menghasilkan persamaan sistem orde dua :

$$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} S + 1} = \frac{133,4118}{0,00000711S^2 + 0,002915S + 1}$$

4.5.2 Perhitungan Nilai Root Mean Square Error (RMSE)

Setelah didapatkan 5 pemodelan matematika dari *SEPIC converter*, langkah selanjutnya mencari nilai *error* terkecil dari pemodelan tersebut. Dengan mengetahui nilai *error* terkecil tersebut maka desain kontroler PID dapat lebih presisi. Penelitian ini metode *RMSE* untuk mendapatkan nilai *error* terkecil sesuai persamaan (2-38) berdasarkan data yang didapatkan dari simulasi pada Lampiran 3 s/d 7. Nilai dari kelima pemodelan sistem dan nilai *error* ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pemodelan sistem dan nilai *RMSE* dengan *duty cycle* berbeda

No	Duty Cycle	Model Matematika	Nilai RMSE
1	0,83	$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{117,6506024}{0,00000586869S^2 + 0,002341731S + 1}$	1,622346
2	0,846	$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{129,7872}{0,0000731 + 0,002854S + 1}$	1,703437



3	0,85	$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{133,4118}{0,00000711S^2 + 0,002915S + 1}$	1,618954
4	0,86	$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{143,023256}{0,0000082796S^2 + 0,00348306S + 1}$	1,671027
5	0,87	$\frac{V_o(s)}{U(s)} = \frac{153,90846}{0,0000106108S^2 + 0,004217568S + 1}$	2,041190

Berdasarkan tabel 4.3 diketahui bahwa dari kelima nilai *duty cycle* tersebut yang memiliki nilai *error* terkecil yaitu *duty cycle* 0,6667. Dengan mengetahui nilai *error* terkecil, maka dapat dilakukan penentuan parameter-parameter pengendali PID menggunakan model matematika pada *duty cycle* 0,6667. Untuk langkah selanjutnya yaitu dilakukan desain pengendali PID.

4.5.3 Perhitungan Nilai K_p , K_i , dan K_d

Saat mendesain pengendali PID dibutuhkan nilai dari parameter-parameter pengendali PID. Hal pertama yang dilakukan adalah dengan melihat respon pada Gambar 4.2 dan menggunakannya untuk menentukan nilai dari *settling time*. Terdapat dua kriteria dalam penentuan *settling time* yaitu dengan kriteria ($\pm 5\%$) dan ($\pm 2\%$).

Pada penelitian ini digunakan *settling time* dengan kriteria ($\pm 5\%$), sehingga diperoleh:

$$\text{Tegangan saat } t_s(+5\%) = 113,4 + \left(113,4 \times \frac{5}{100}\right) = 119,07$$

$$\text{Tegangan saat } t_s(+5\%) = 113,4 - \left(113,4 \times \frac{5}{100}\right) = 107,73$$

Dengan melihat respon keluaran pada Gambar 4.2 untuk nilai tegangan $t_s(\pm 5\%)$, maka diperoleh nilai *settling time* yaitu 0,07135 detik. Berdasarkan persamaan (2-37), maka diperoleh τ^* sebesar 0,023783 detik.

Untuk menentukan parameter PID diperlukan nilai K (penguatan), ξ (rasio redaman sistem), dan ω_n (frekuensi natural) dari pemodelan sistem pada *duty cycle*

(D) 0,85. Nilai dari parameter tersebut adalah :

$$\xi = 0,546656$$

$$K = 133,4118$$

$$\omega_n = 375,053$$



Parameter pengendali PID diantaranya adalah K_p , τ_i , dan τ_d . Untuk perhitungan waktu integral (τ_i) yaitu dengan memasukkan nilai dari ξ dan ω_n ke dalam persamaan (2-46) sebagai berikut:

$$\tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{2 \cdot 0,546656}{375,053} = 0,002915$$

Untuk perhitungan waktu diferensial (τ_d) yaitu dengan memasukkan nilai dari ω_n dan τ_i ke dalam persamaan (2-47) sebagai berikut:

$$\tau_d = \frac{1}{\omega_n^2 \cdot \tau_i} = \frac{1}{(375,053)^2 \cdot 0,002915} = 0,002439$$

Untuk perhitungan nilai dari penguatan proporsional (K_p) yaitu dengan memasukkan nilai dari τ_i dan τ_d ke persamaan (2-48) sebagai berikut:

$$K_p = \frac{\tau_i}{\tau^* \cdot K} = \frac{0,002915}{0,023783 \cdot 133,4118} = 0,000919$$

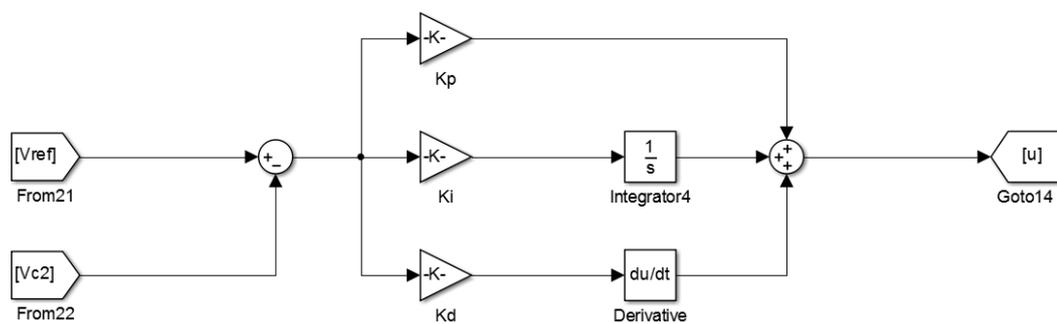
Setelah mendapatkan nilai dari K_p maka nilai dari K_i (penguatan integral) dan K_d (penguatan diferensial) dapat ditentukan sesuai dengan persamaan (2-49) dan (2-50) sebagai berikut :

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} = \frac{0,000919}{0,002915} = 0,315161$$

$$K_d = K_p \tau_d = 0,000919 \cdot 0,002439 = 0,00000224$$

4.5.4 Desain Pengendali PID untuk SEPIC Converter

Setelah melakukan langkah – langkah sebelumnya, langkah selanjutnya mendesain pengendali PID dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink*. Berikut ini merupakan desain pengendali PID pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Blok diagram pengendali PID pada *MATLAB Simulink*

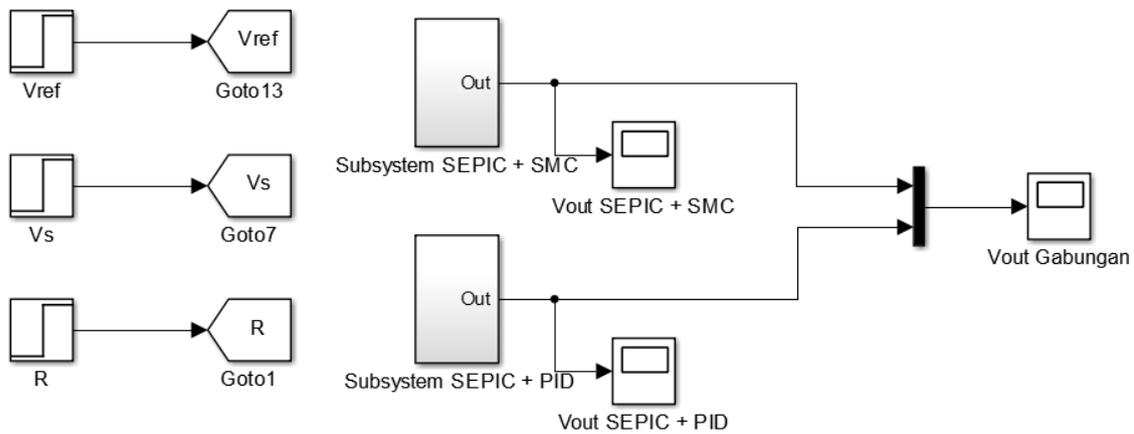
Sumber : Penulis



Gambar 4.4 merupakan pemodelan pengendali PID dengan nilai K_P , K_i , dan K_d yang telah dihitung sebelumnya menjadi blok – blok diagram pada *software MATLAB Simulink* dengan mengacu pada persamaan (2-39). Blok – blok diagram di atas disesuaikan dengan blok – blok diagram pada Gambar 4.1 pada blok V_{REF} dan V_{C2} . Hasil keluaran pengendali pada blok U nantinya akan menggantikan nilai *duty cycle* (D) pada *SEPIC converter*.

4.6. Simulasi dan Analisis Performa SEPIC Converter

Setelah mendesain kedua pengendali selesai, maka langkah selanjutnya yaitu melakukan simulasi pada *MATLAB Simulink*. Untuk diagram blok dari *SEPIC converter* dengan *sliding mode controller* dan PID pada *MATLAB Simulink* ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Blok diagram *SEPIC converter* dengan *SMC* dan pengendali PID
 Sumber : Penulis

Pada blok rangkaian pada Gambar 4.5 terdapat beberapa masukan yang dapat diubah-ubah untuk pengujian sistem, diantaranya terdiri dari blok tegangan referensi (V_{REF}), tegangan masukan (V_S) dan beban (R). Untuk mengubah nilai dari tegangan masukan dapat diubah melalui blok V_S , mengubah nilai dari beban R melalui blok R , dan mengubah nilai dari tegangan referensi V_{REF} melalui blok V_{REF} . Untuk menguji performa *SEPIC converter* dengan *Sliding Mode Controller* (*SMC*) dan pengendali PID dilakukan dengan mengubah-ubah nilai tegangan referensi (V_{REF}), tegangan masukan (V_S) dan beban (R), kemudian melihat respon keluaran pada blok V_{out} Gabungan. Proses simulasi dilakukan dengan memberikan gangguan pada detik ke 0,2. Ada tiga gangguan yang diberikan yaitu perubahan nilai dari tegangan referensi dengan nilai tegangan masukan dan beban tetap, perubahan dari nilai tegangan masukan, dengan nilai tegangan referensi dan beban tetap, dan Gangguan

yang terakhir yaitu perubahan perubahan nilai beban, dengan nilai dari tegangan referensi dan tegangan masukan tetap.

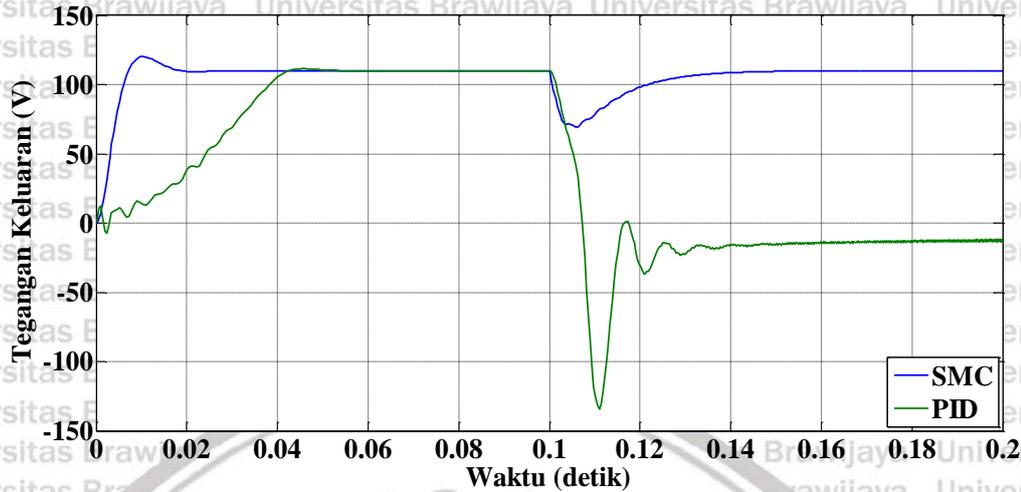
4.6.1 Simulasi ketika Tegangan Masukan Berubah

Pada simulasi yang pertama, tegangan masukan (V_S) akan diubah-ubah menjadi 10 V, 15 V, 25 V, 30 V, dan 40 V dari 20 V, sedangkan untuk tegangan referensi (V_{REF}) dan beban R dibuat konstan. Untuk format tabel simulasi, ditunjukkan pada Tabel 4.4:

Tabel 4.4 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan masukan berubah

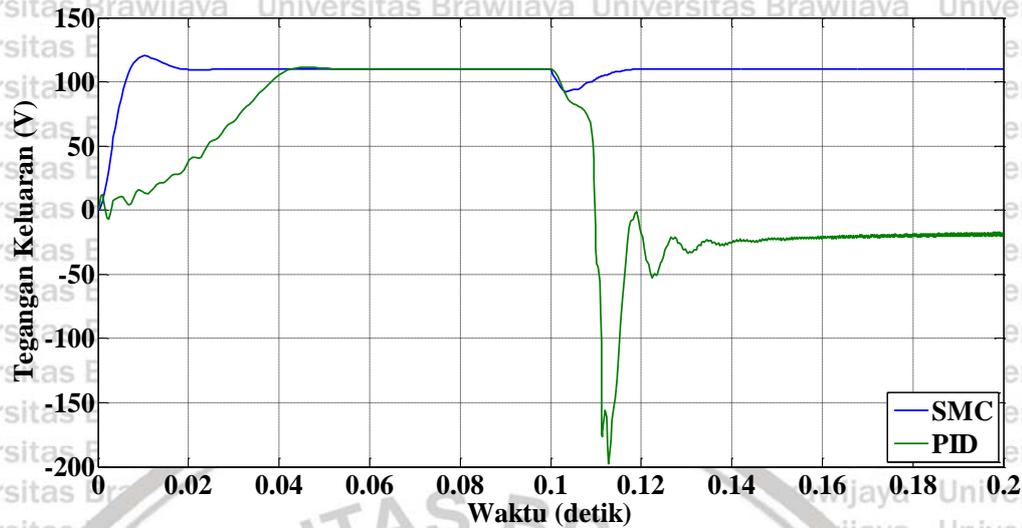
No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)
1	110	110	10	0,0498	-40,68	Tidak stabil	Tidak stabil
2			15	0,0189	-17,71	Tidak stabil	Tidak stabil
3			25	0,0235	14,60	0,0235	21,00
4			30	0,0265	26,70	0,0287	36,60
5			40	0,0341	44,60	0,0569	58,80

Berdasarkan tabel percobaan di atas dapat disimpulkan hasil dari *SEPIC converter* ketika diberi gangguan tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 10 V, 15 V, 25 V, 30 V, dan 40 V dengan *SMC* mampu menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat dan stabil dibandingkan dengan pengendali PID. Untuk nilai deviasi tegangan (ΔV), *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil dan stabil dibandingkan dengan pengendali PID. Adapun hasil respon keluaran untuk kedua pengendali tersebut dengan terjadinya perubahan tegangan masukan (V_S) pada Gambar 4.6 – 4.10.



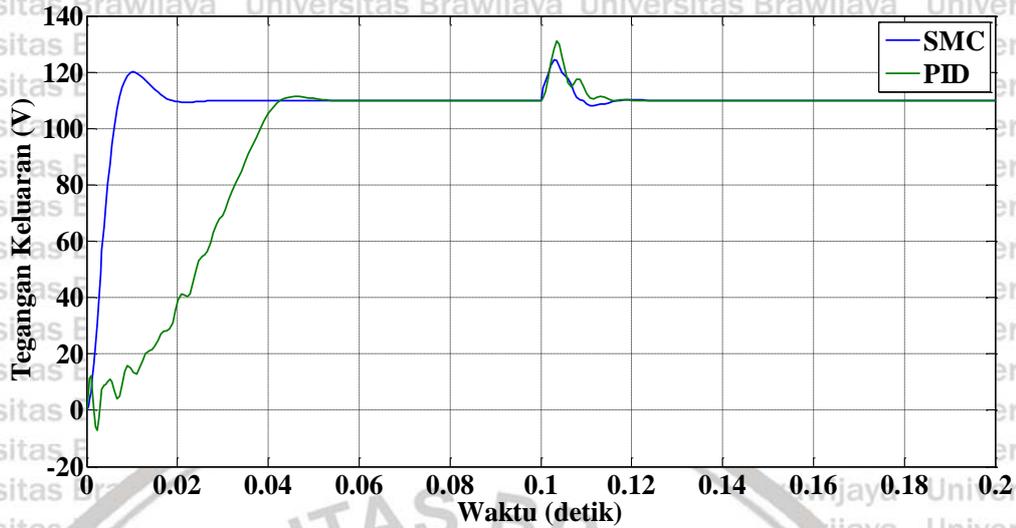
Gambar 4.6 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 10 V
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.6, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 10 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih stabil yaitu sebesar -40,68 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang sangat tinggi atau dengan kata lain sistem tidak stabil. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0498 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.



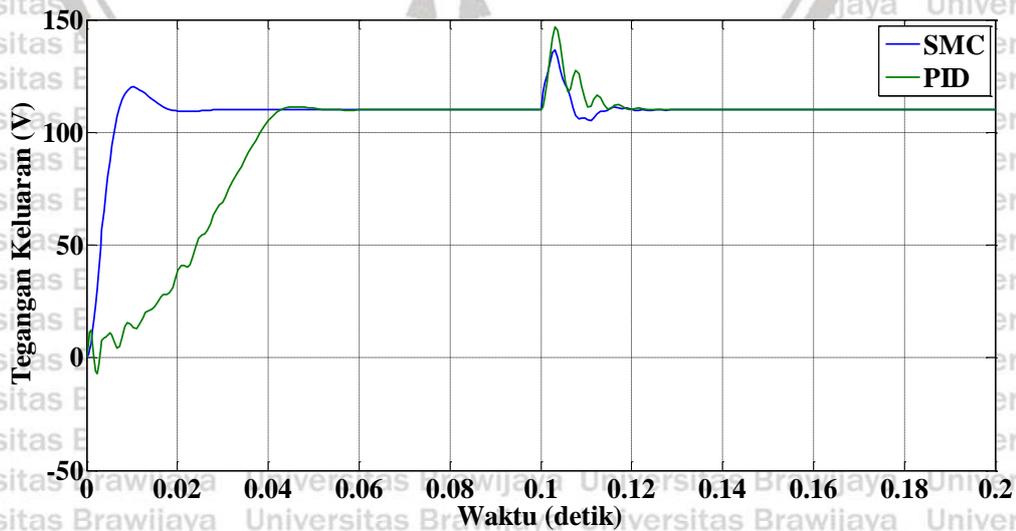
Gambar 4.7 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 15 V
Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.7, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 10 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih stabil yaitu sebesar -17,71 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang sangat tinggi atau dengan kata lain sistem tidak stabil. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0189 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.



Gambar 4.8 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 25 V
 Sumber : Penulis

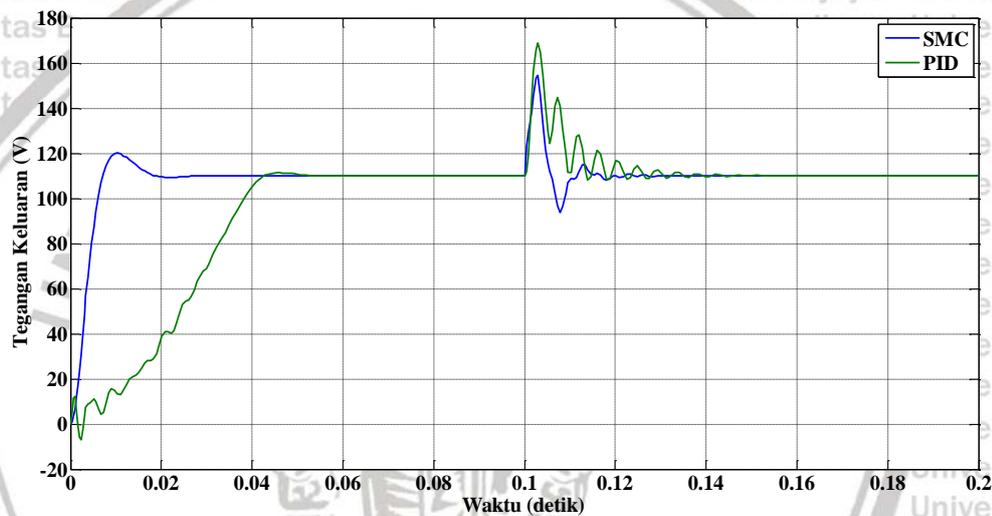
Pada Gambar 4.8, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 25 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar 14,60 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar 21,00 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang sama dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0235 detik.



Gambar 4.9 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 30 V
 Sumber : Penulis



Pada Gambar 4.9, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 30 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar 26,70 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar 36,60 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama 0,0265 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0287 detik.



Gambar 4.10 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan masukan berubah menjadi 24 V
Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.10, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 20 V menjadi 40 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar 44,60 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar 58,80 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama 0,0341 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0569 detik.

Berdasarkan Tabel 4.4 dan Gambar 4.6 – 4.10, ketika tegangan masukan (V_S) berubah menjadi lebih kecil dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil

dibandingkan dengan pengendali PID. ketika tegangan masukan (V_S) berubah menjadi lebih besar dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih kecil dan lebih cepat dibandingkan dengan pengendali PID. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *SEPIC converter* dengan *SMC* memiliki kemampuan lebih baik dalam mengatasi gangguan berupa perubahan tegangan masukan dibandingkan dengan pengendali PID.

4.6.2 Simulasi ketika Tegangan Pembebanan Berubah

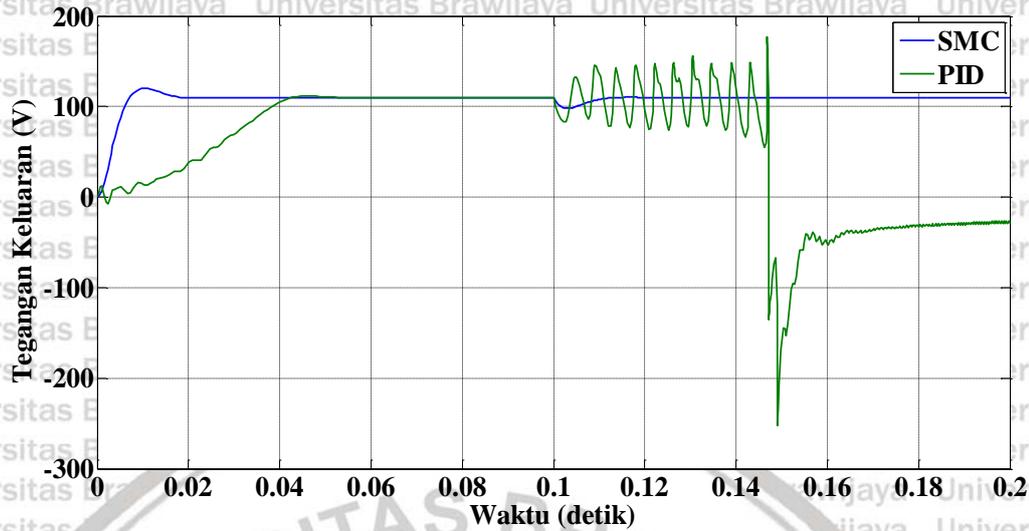
Pada simulasi yang kedua, beban R akan diubah-ubah menjadi 90 Ω , 100 Ω , 120 Ω , 130 Ω , dan 140 Ω dari 110 Ω , sedangkan untuk tegangan masukan (V_S) dan tegangan referensi (V_{REF}) dibuat konstan. Untuk format tabel simulasi, ditunjukkan pada Tabel 4.5:

Tabel 4.5 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika pembebanan berubah

No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)
1	110	90	20	0,0147	-11,95	Tidak stabil	Tidak stabil
2		100		0,0126	-5,70	0,0522	-10,66
3		120		0,0199	5,20	0,0212	7,60
4		130		0,0257	10,10	0,0270	13,10
5		140		0,0292	14,50	0,0300	17,40

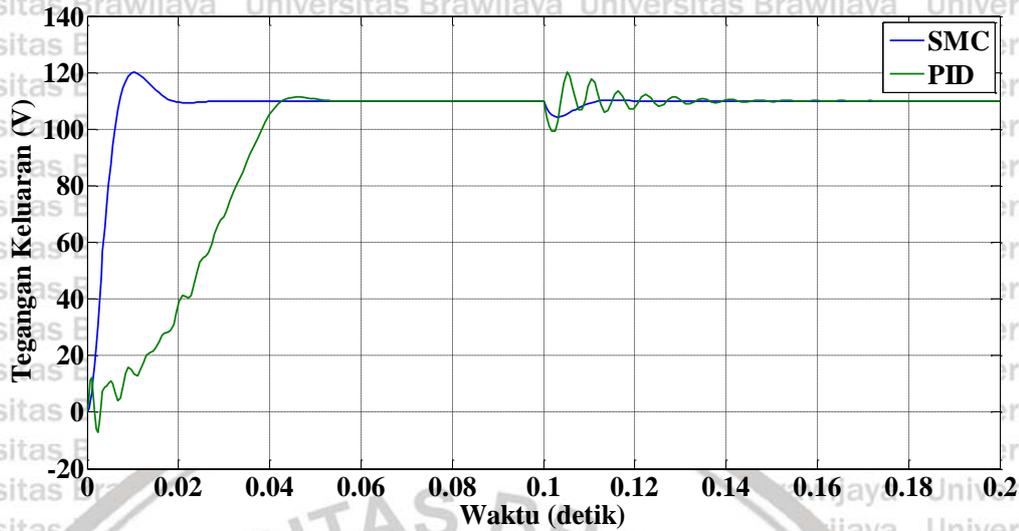
Berdasarkan tabel percobaan di atas dapat disimpulkan hasil dari *SEPIC converter* ketika diberi gangguan tegangan masukan berubah dari 110 Ω menjadi 90 Ω , 100 Ω , 120 Ω , 130 Ω , dan 140 Ω dengan *SMC* mampu menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat dan stabil dibandingkan dengan pengendali PID. Untuk nilai deviasi tegangan (ΔV), *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil dan stabil dibandingkan dengan pengendali PID. Adapun hasil respon keluaran untuk kedua pengendali tersebut dengan terjadinya perubahan beban R ditunjukkan pada Gambar 4.11 – 4.15.





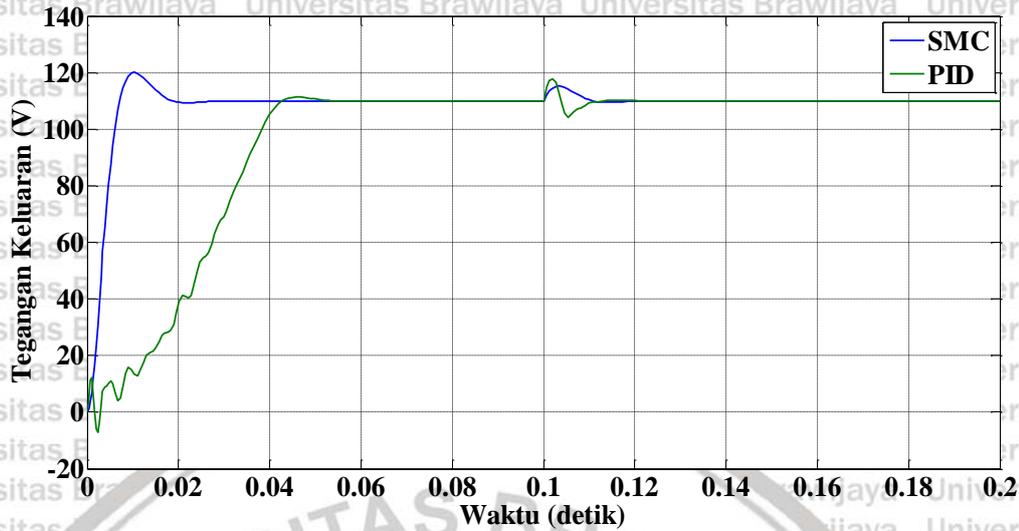
Gambar 4.11 Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 90 Ω
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.11, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika beban *R* berubah dari 110 Ω menjadi 90 Ω pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih stabil yaitu sebesar -11,95 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang sangat tinggi atau dengan kata lain sistem tidak stabil. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0147 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.



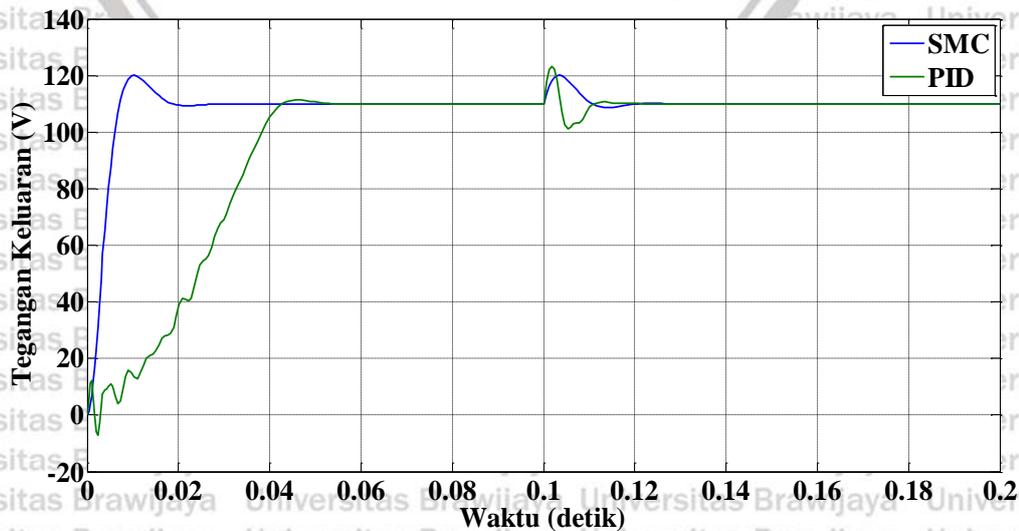
Gambar 4.12 Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 100 Ω
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.12, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika beban *R* berubah dari 110 Ω menjadi 100 Ω pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar -5,70 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar -10,66 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama 0,0126 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0522 detik.



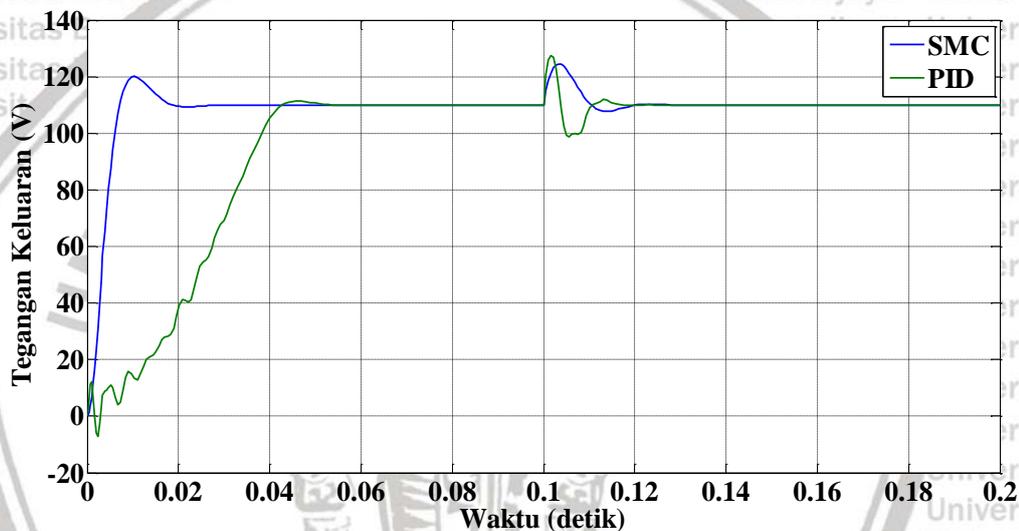
Gambar 4.13 Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 120 Ω
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.13, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika beban *R* berubah dari 110 Ω menjadi 120 Ω pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar 5,20 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar 7,60 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama 0,0199 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0212 detik.



Gambar 4.14 Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 130 Ω
 Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.14, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika beban R berubah dari 110Ω menjadi 120Ω pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar $10,10 \text{ V}$ jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar $13,10 \text{ V}$. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama $0,0257$ detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama $0,0270$ detik.



Gambar 4.15 Hasil tegangan keluaran ketika pembebanan berubah menjadi 50Ω
Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.15, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika beban R berubah dari 110Ω menjadi 120Ω pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar $14,50 \text{ V}$ jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar $17,40 \text{ V}$. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih cepat yaitu selama $0,0292$ detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama $0,0300$ detik.

Berdasarkan Tabel 4.5 dan Gambar 4.11 – 4.15, ketika beban R berubah menjadi lebih kecil dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih kecil dan stabil

dibandingkan dengan pengendali PID, ketika beban R berubah menjadi lebih besar dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih kecil dan lebih cepat dibandingkan dengan pengendali PID, namun untuk waktu pemulihan (t_{rec}) perbedaannya tidak terlalu signifikan. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *SEPIC converter* dengan *SMC* memiliki kemampuan lebih baik dalam mengatasi gangguan berupa perubahan tegangan masukan dibandingkan dengan pengendali PID.

4.6.3 Simulasi ketika Tegangan Referensi Berubah

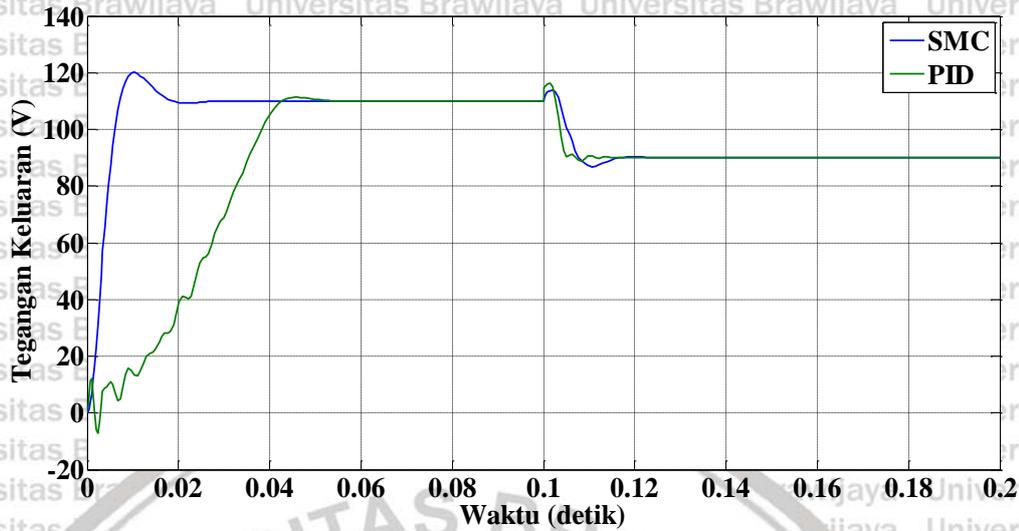
Pada simulasi yang pertama, tegangan referensi (V_{REF}) akan diubah-ubah menjadi 90 V, 100 V, 120 V, 130 V, dan 140 V dari 110 V, sedangkan untuk tegangan masukan (V_S) dan beban R dibuat konstan. Untuk format tabel simulasi, ditunjukkan pada Tabel 4.6:

Tabel 4.6 Hasil simulasi *SEPIC converter* ketika tegangan referensi berubah

No	V_{REF} (V)	R (Ω)	V_S (V)	SMC		PID	
				t_{rec} (s)	ΔV (V)	t_{rec} (s)	ΔV (V)
1	90	110	20	0,0238	-3,26	0,0185	-1,22
2	100			0,0192	-1,22	0,0182	-0,81
3	120			0,0216	0,60	Tidak stabil	0,80
4	130			0,0234	0,70	Tidak stabil	Tidak stabil
5	140			0,0269	0,80	Tidak stabil	Tidak stabil

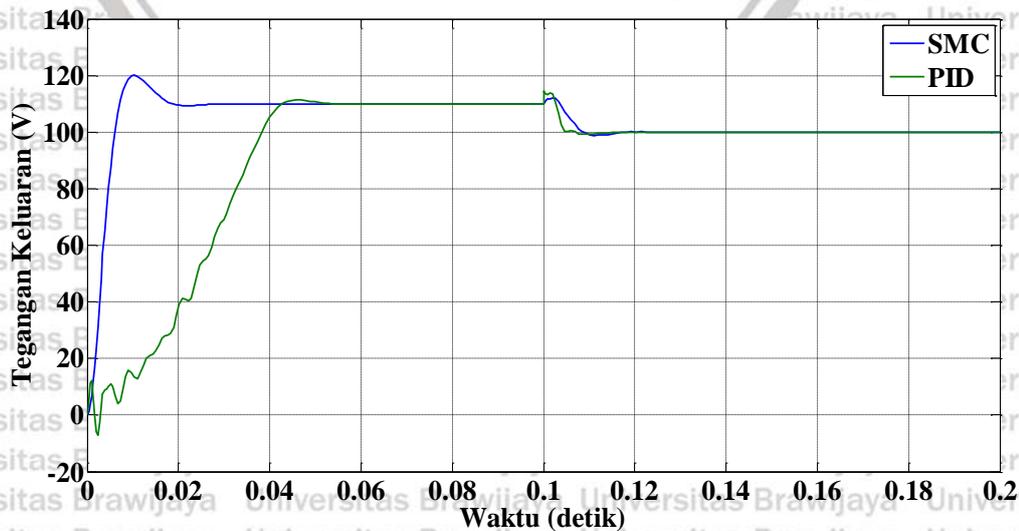
Berdasarkan tabel percobaan di atas dapat disimpulkan hasil dari *SEPIC converter* ketika diberi gangguan tegangan referensi berubah dari 110 V menjadi 90 V, 110 V, 120 V, 130 V, dan 140 V dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih lama ketika tegangan referensi (V_{REF}) di bawah 110 V namun lebih stabil ketika tegangan referensi (V_{REF}) di atas 110 V dibandingkan dengan pengendali PID. Untuk nilai deviasi tegangan (ΔV), *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih besar ketika tegangan referensi (V_{REF}) di bawah 110 V namun lebih stabil ketika tegangan referensi (V_{REF}) di atas 110 V dibandingkan dengan pengendali PID. Adapun hasil respon keluaran untuk kedua pengendali tersebut dengan terjadinya perubahan tegangan masukan (V_S) pada Gambar 4.16 – 4.20.





Gambar 4.16 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 90 V
 Sumber : Penulis

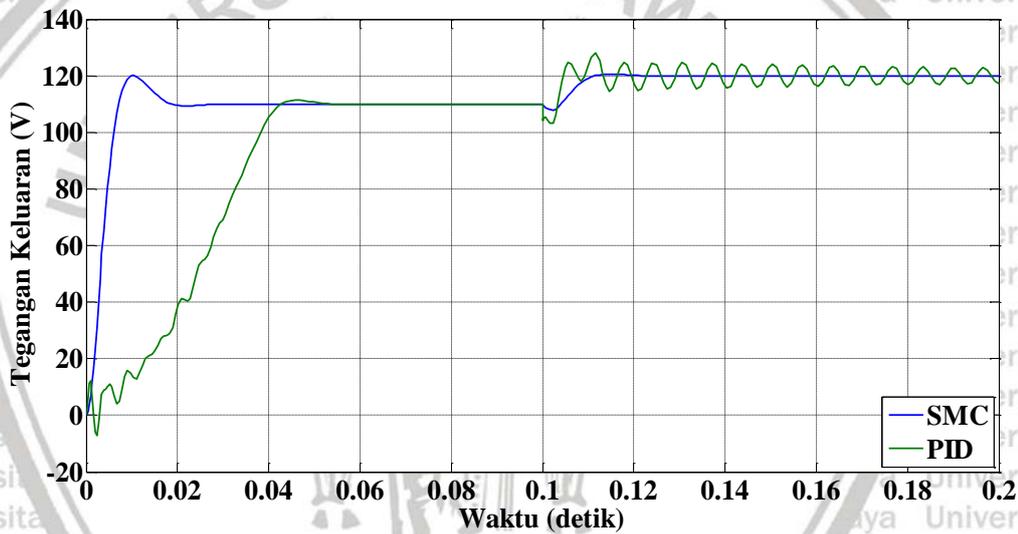
Pada Gambar 4.16, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 110 V menjadi 90 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih besar yaitu sebesar -1,22 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar -0,81 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih lama yaitu selama 0,0192 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0182 detik.



Gambar 4.17 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 100 V

Sumber : Penulis

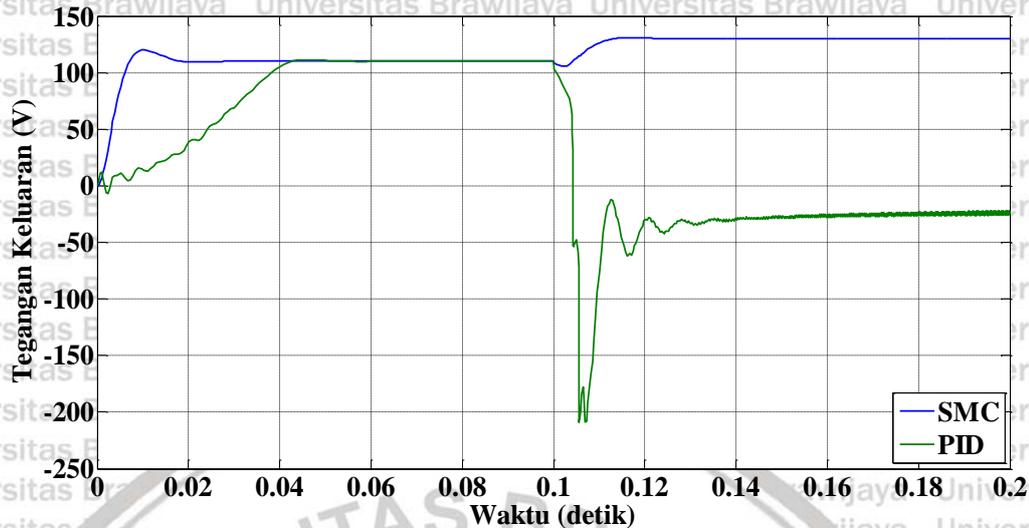
Pada Gambar 4.17, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 110 V menjadi 100 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih besar yaitu sebesar -3,26 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) sebesar -1,22 V. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih lama yaitu selama 0,0238 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yaitu selama 0,0185 detik.



Gambar 4.18 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 120 V

Sumber : Penulis

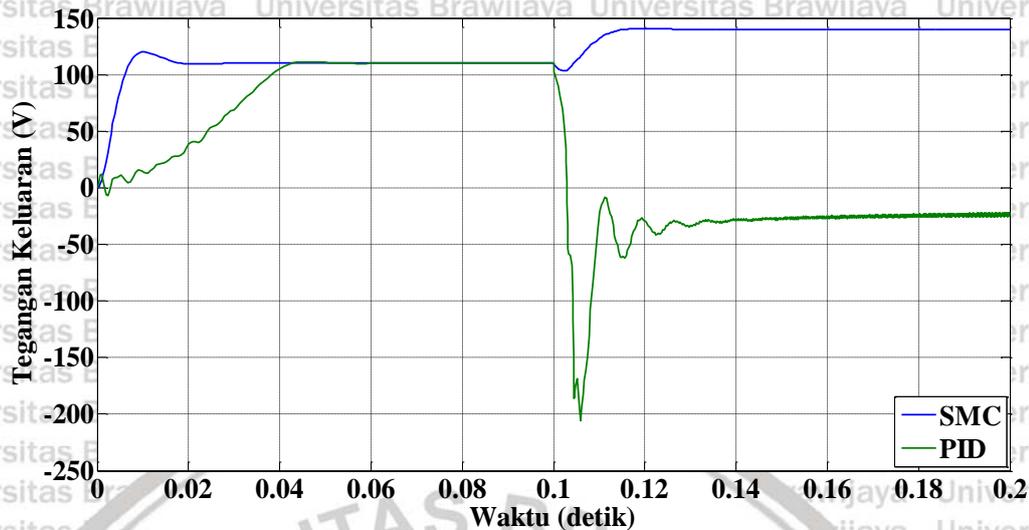
Pada Gambar 4.7 (c), dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 110 V menjadi 120 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih kecil yaitu sebesar 0,6 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID*. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0216 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.



Gambar 4.19 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 130 V

Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.19, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 110 V menjadi 120 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih stabil yaitu sebesar 0,7 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang sangat tinggi atau dengan kata lain sistem tidak stabil. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0234 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.



Gambar 4.20 Hasil tegangan keluaran ketika tegangan referensi berubah menjadi 140 V

Sumber : Penulis

Pada Gambar 4.20, dapat diperhatikan bahwa sistem dengan *SMC* lebih cepat mencapai kondisi *steady – state*, namun nilai *overshoot*-nya lebih tinggi dibandingkan *PID* saat detik awal. Ketika tegangan masukan berubah dari 110 V menjadi 120 V pada detik 0,1, *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang lebih stabil yaitu sebesar 0,8 V jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) yang sangat tinggi atau dengan kata lain sistem tidak stabil. Pada sistem dengan *SMC* menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih stabil yaitu selama 0,0269 detik jika dibandingkan dengan pengendali *PID* yang menghasilkan waktu pemulihan (t_{rec}) tak terhingga atau sistem tidak akan kembali pada keadaan *steady – state* sehingga sistem dikatakan tidak stabil.

Berdasarkan Tabel 4.6 dan Gambar 4.16 – 4.20, ketika beban *R* berubah menjadi lebih kecil dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih besar dibandingkan dengan pengendali *PID* namun perbedaannya tidak signifikan. ketika beban *R* berubah menjadi lebih besar dari nilai semula maka *SEPIC converter* dengan *SMC* menghasilkan nilai deviasi tegangan (ΔV) dan waktu pemulihan (t_{rec}) yang lebih kecil dan stabil dibandingkan dengan pengendali *PID*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *SEPIC converter* dengan *SMC* memiliki kemampuan lebih baik dalam mengatasi gangguan berupa perubahan tegangan referensi dibandingkan dengan pengendali *PID*.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis pada penelitian ini, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dalam merancang *SEPIC converter* pada *software MATLAB Simulink* dibutuhkan tahap – tahap perancangan yaitu menentukan spesifikasi, menghitung parameter, dan mendesain *SEPIC converter* dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink*. Spesifikasi *SEPIC converter* yang ditentukan adalah nilai tegangan masukan (V_S) sebesar 20 V, tegangan referensi atau keluaran (V_{REF} atau V_O) sebesar 110 V, beban resistor (R) sebesar 110 Ω , frekuensi pensaklaran (f) sebesar 50 kHz, *ripple* arus induktor 1 dan 2 (ΔI_{L1} dan ΔI_{L2}) sebesar 0,05 A, dan *ripple* tegangan kapasitor 1 dan 2 (ΔV_{C1} dan ΔV_{C2}) sebesar 1 V. Berdasarkan perhitungan parameter *SEPIC converter*, didapatkan nilai *duty cycle* sebesar 0,846, induktor 1 dan 2 sebesar 6,77mH (10mH yang terdapat di pasaran), kapasitor 1 dan 2 sebesar 16,92 μ F (22 μ F yang terdapat di pasaran). Kemudian disusun dalam bentuk blok diagram dan dilakukan simulasi. Hasil simulasi diperoleh tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open loop* didapatkan tegangan puncak (V_p) sebesar 128 V pada waktu (t_p) 0,009983 detik dan grafik mencapai tegangan *steady – state* (V_{OSS}) sebesar 113,4 V pada waktu 0,0464. Performa *SEPIC converter* dapat disimpulkan bahwa hasil tegangan keluaran memiliki nilai *overshoot* sebesar 18 V dan tegangan keluaran saat kondisi *steady – state* kurang stabil atau masih mengalami osilasi.
2. Perancangan *Sliding Mode Controller (SMC)* untuk *SEPIC converter* dilakukan dengan menentukan referensi yang akan digunakan terlebih dahulu. Pada penelitian ini menggunakan arus induktor 1 sebagai referensi (I_{L1}). Kemudian menentukan persamaan *sliding surface* untuk menghitung persamaan U_{EQ} dan U_N yang nantinya akan didapatkan nilai U untuk menggantikan nilai *duty cycle* *SEPIC converter* pada kondisi *open – loop*. Setelah didapatkan nilai U , *SMC* dapat dimodelkan dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink*.
3. Perancangan pengendali PID untuk *SEPIC converter* dilakukan dengan memodelkan tegangan keluaran *SEPIC converter* pada kondisi *open – loop* dalam

bentuk pemodelan sistem orde dua terlebih dahulu. Kemudian menghitung parameter pengendali PID dan menentukan nilai *duty cycle* (D) yang memiliki nilai *root mean square error* (*RMSE*) paling kecil. Kemudian menghitung nilai K_p , K_i , dan K_d yang akan dijumlahkan untuk mengganti nilai *duty cycle* (D) *SEPIC converter*. Pada penelitian ini didapatkan nilai K_p , K_i , dan K_d berturut – turut sebesar 0,000919, 0,315161, dan 0,00000224. Setelah didapatkan nilai – nilai tersebut, pengendali PID dapat dimodelkan dalam bentuk blok diagram pada *software MATLAB Simulink*.

4. Performa *SEPIC converter* menggunakan *SMC* dan pengendali PID dengan gangguan berupa perubahan tegangan masukan, beban resistor, dan tegangan referensi dapat disimpulkan bahwa *SEPIC converter* menggunakan *SMC* memiliki kemampuan lebih baik dalam mengatasi gangguan dibandingkan menggunakan pengendali PID.

5.2. Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Melakukan rancang bangun untuk *SEPIC converter* menggunakan *Sliding Mode Controller* (*SMC*).
2. Melakukan penelitian untuk pengaplikasian *SEPIC converter* pada mode *buck*.
3. Pengembangan lebih lanjut terhadap *Sliding Mode Controller* (*SMC*) untuk *SEPIC converter* menentukan persamaan *sliding surface* yang lebih kompleks.

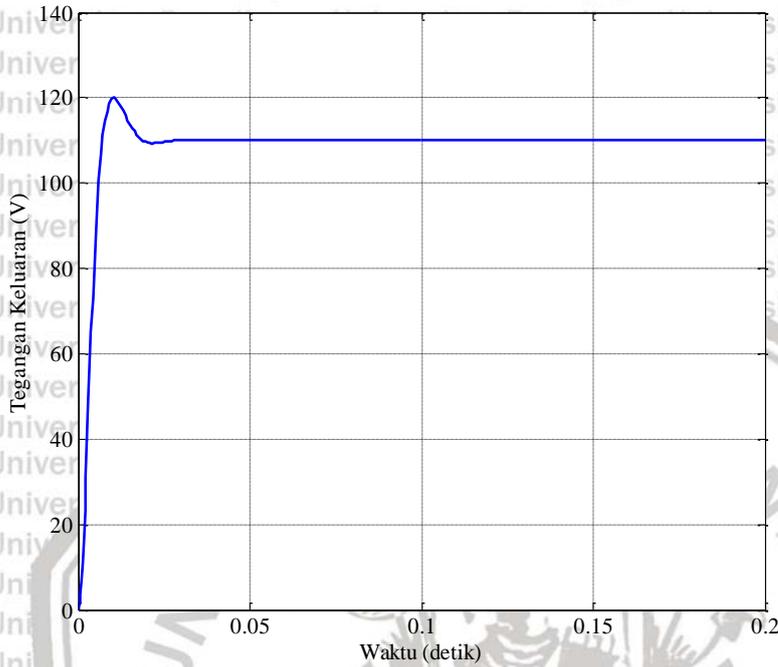
DAFTAR PUSTAKA

- Arbiyanti, P. 2007. *Aplikasi Sliding Mode Controller pada Kontrol Posisi Sistem Servo Pneumatic*. Seminar Nasional Sains dan Teknologi. Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma Yogyakarta.
- Chong Tan, S. 2008. *General Design Issues of Sliding-Mode Controllers in DC-DC Converters*. IEEE. Hongkong: Departement of Electronic and Information Engineering, 16-18.
- Forsyth, A.J., Mollov, S.V. 1998. *Modelling and control of DC-DC converters*. Power Engineering Journal, 12(5), 229–236.
- Hart, D.W. 2011. *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Hren, A., Slibar, P. 2005. *Full Order Dynamic Model of SEPIC converter*. IEEE ISIE 20005. Slovenia: Electrical Engineering and Computer Science University of Maribor.
- Kircioglu, O., Camur, S., Unlu, M. 2016. *Modelling and Analysis of DC – DC SEPIC Converter with Coupled Inductors*. IEEE. Turkey: Electrical Engineering Department Kocaeli University.
- Naik, Brijesh Bhagirath. 2018. *Sliding Mode Control For Power Converters With Modified Sliding Function For Improved Performance*. India: Instrumentation and Control Engineering, Gujarat Technological University Ahmedabad, 17-18.
- Noor, N.A., Samman, F.A., Akil, Y.S. 2015. *Studi Perbandingan Kinerja Konverter DC-DC Penaik Tegangan Jenis-Jenis DC Chopper dan Charge Pump Multi-Stage*. Jurnal Prosiding. Makassar: Politeknik Negeri Ujung Pandang. ISBN: 978-602-72676-3-3, pp. 33 – 39.
- Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Pandey, S.K. Patil, S.L., Phadke, S.B., Deshpande, A.S. 2016. *Investigation of Sliding Mode Control of Higher Order DC-DC Converters*. IEEE. India: College of Engineering.
- Paranthagan, B., Marimuthu, M., Shamili, S.P. 2015. *Comparative Analysis of Performance of the SEPIC converter Using PID and Fuzzy Logic Controllers for LED Lighting Applications*. International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE). India: Electrical and Electronics Department Saranathan College of Engineering.

- Poornima, Dr. Rashi. 2017. *Design and Simulation of Interleaved SEPIC Converter for Photovoltaic Applications*. International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication. Tumkuru: Siddaganga Institute of Technology.
- Slotine, Jean-Jacques E., Li, W. 1991. *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall. Michigan: Michigan University.
- Vijay, K.O. 2016. *Comparison between Zeta Converter and Boost Converter using Sliding Mode Controller*. International Journal of Research & Technology (IJERT), India: School of Electrical Engineering, Vit University, 2, 11, 16.
- Yudaningtyas, E. 2017. *Belajar Sistem Kontrol & Pembahasan*. Malang: UB Press.



LAMPIRAN



Lampiran 1. Tegangan keluaran SEPIC converter menggunakan SMC tanpa gangguan



Lampiran 2. Tegangan keluaran SEPIC converter menggunakan pengendali PID tanpa gangguan



No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error	No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error
1	0.0000	0.0000	0.0000	214	110.0004	109.1105	0.7920
2	0.0000	0.0000	0.0000	215	110.0004	109.0745	0.8572
3	0.0000	0.0000	0.0000	216	110.0002	109.0209	0.9590
4	0.0000	0.0000	0.0000	217	110.0001	109.1377	0.7437
5	0.0004	0.0000	0.0000	218	109.9999	109.0358	0.9296
6	0.0100	0.0000	0.0001	219	109.9998	109.0722	0.8605
7	0.2450	0.0025	0.0588	220	109.9999	109.1242	0.7668
8	1.0968	0.0503	1.0952	221	109.9999	109.0084	0.9831
9	3.2225	0.4556	7.6561	222	110.0000	109.1106	0.7910
10	7.0639	2.4942	20.8829	223	110.0001	109.0727	0.8601
11	11.1442	8.1961	8.6917	224	110.0001	109.0219	0.9569
12	12.4815	15.7818	10.8922	225	110.0001	109.1363	0.7461
13	10.9383	19.4469	72.3971	226	110.0000	109.0366	0.9282
14	5.7252	14.1377	70.7700	227	109.9999	109.0732	0.8588
15	0.4165	1.1624	0.5564	228	109.9999	109.1226	0.7697
16	-3.6190	-10.2288	43.6886	229	109.9999	109.0082	0.9834
17	-6.6960	-15.6407	80.0078	230	109.9999	109.1129	0.7868
18	-6.6185	-9.9957	11.4051	231	110.0000	109.0704	0.8640
19	-4.5949	-2.1527	5.9639	232	110.0000	109.0194	0.9617
20	-0.1170	4.1233	17.9797	233	110.0000	109.1285	0.7596
21	3.7461	4.2091	0.2143	234	110.0001	109.0501	0.9024
22	6.5575	3.7038	8.1439	235	110.0000	109.0696	0.8657
23	8.4284	6.0300	5.7520	236	110.0000	109.1092	0.7936
24	9.2626	10.5187	1.5777	237	110.0000	108.9919	1.0162
25	9.5491	13.1030	12.6303	238	109.9999	109.1508	0.7210
26	9.7466	11.6957	3.7994	239	109.9999	109.0543	0.8943
27	10.0793	8.2496	3.3478	240	110.0000	109.0409	0.9199
28	10.5385	7.0388	12.2484	241	110.0000	109.1496	0.7231
29	10.8893	9.5821	1.7087	242	110.0000	108.9825	1.0353
30	10.8927	13.1250	4.9833	243	110.0000	109.1067	0.7980
31	10.3010	13.6906	11.4889	244	110.0000	109.1053	0.8006
32	8.9804	9.2765	0.0877	245	110.0000	108.9898	1.0206
33	7.5980	5.2554	5.4878	246	110.0000	109.1386	0.7420
34	6.1645	4.0931	4.2905	247	110.0000	109.0698	0.8652
35	5.1774	5.6162	0.1925	248	110.0000	109.0402	0.9213
36	4.8992	6.4559	2.4230	249	110.0000	109.1612	0.7036
37	5.3967	5.3871	0.0001	250	110.0000	108.9837	1.0328
38	6.6206	4.4689	4.6300	251	110.0000	109.0922	0.8242



39	8.7117	6.7456	3.8654	252	110.0000	109.1165	0.7806
40	11.1387	11.7188	0.3365	253	110.0000	108.9844	1.0314
41	13.2357	14.9487	2.9346	254	110.0000	109.1624	0.7016
42	14.9464	15.4719	0.2761	255	110.0000	109.0554	0.8922
43	16.0632	15.0395	1.0480	256	110.0000	109.0275	0.9458
44	16.5543	16.0402	0.2643	257	110.0000	109.1633	0.7001
45	16.3024	17.4101	1.2270	258	110.0000	108.9854	1.0294
46	15.6406	16.6649	1.0493	259	110.0000	109.0864	0.8346
47	14.7816	13.9999	0.6110	260	110.0000	109.1197	0.7749
48	14.1760	12.8233	1.8299	261	110.0000	108.9808	1.0388
49	13.9048	13.6223	0.0798	262	110.0000	109.1573	0.7102
50	14.0720	14.6349	0.3168	263	110.0000	109.0639	0.8762
51	14.7233	14.5685	0.0240	264	110.0000	109.0255	0.9497
52	15.7744	14.6325	1.3041	265	110.0000	109.1666	0.6946
53	17.2282	16.6599	0.3230	266	110.0000	108.9912	1.0177
54	18.6835	19.2047	0.2716	267	110.0000	109.0780	0.8501
55	20.0199	20.2189	0.0396	268	110.0000	109.1210	0.7726
56	21.0487	20.3812	0.4455	269	110.0000	108.9774	1.0458
57	21.7497	21.4258	0.1049	270	110.0000	109.1531	0.7173
58	22.1957	22.5762	0.1448	271	110.0000	109.0713	0.8625
59	22.5817	22.4649	0.0136	272	110.0000	109.0234	0.9538
60	23.1208	22.2586	0.7434	273	110.0000	109.1711	0.6870
61	24.0162	23.5744	0.1952	274	110.0000	108.9941	1.0118
62	25.2234	25.2814	0.0034	275	110.0000	109.0702	0.8646
63	26.8700	26.4194	0.2030	276	110.0000	109.1250	0.7656
64	28.2217	27.6816	0.2918	277	110.0000	108.9705	1.0598
65	29.2814	29.3475	0.0044	278	110.0000	109.1500	0.7226
66	29.9278	30.1177	0.0361	279	110.0000	109.0821	0.8425
67	30.1698	29.8311	0.1147	280	110.0000	109.0164	0.9674
68	30.1599	29.7084	0.2038	281	110.0000	109.1827	0.6680
69	30.2796	30.1076	0.0296	282	110.0000	108.9981	1.0038
70	30.9553	30.3466	0.3704	283	110.0000	109.0530	0.8969
71	32.4975	31.5799	0.8419	284	110.0000	109.1626	0.7013
72	35.2052	34.7452	0.2116	285	110.0000	108.9921	1.0159
73	38.2918	37.9610	0.1094	286	110.0000	109.0808	0.8449
74	41.4896	41.0846	0.1641	287	110.0000	109.1176	0.7786
75	43.4330	43.4392	0.0000	288	110.0000	108.9812	1.0379
76	44.2527	44.2913	0.0015	289	110.0000	109.1553	0.7136
77	44.2210	43.8376	0.1471	290	110.0000	109.0646	0.8749
78	43.8129	43.3736	0.1930	291	110.0000	109.0270	0.9468



79	43.7489	43.2397	0.2593	292	110.0000	109.1657	0.6960
80	44.8432	43.9166	0.8586	293	110.0000	108.9907	1.0186
81	46.9943	46.1787	0.6652	294	110.0000	109.0795	0.8473
82	50.0497	49.5566	0.2431	295	110.0000	109.1201	0.7742
83	53.2271	52.7458	0.2317	296	110.0000	108.9786	1.0433
84	55.8195	55.4949	0.1053	297	110.0000	109.1539	0.7158
85	57.4539	57.2787	0.0307	298	110.0000	109.0691	0.8665
86	58.1822	57.6959	0.2365	299	110.0000	109.0244	0.9518
87	58.7584	58.1069	0.4245	300	110.0000	109.1694	0.6900
88	59.8780	59.1630	0.5113	301	110.0000	108.9932	1.0136
89	61.9984	61.0705	0.8611	302	110.0000	109.0730	0.8593
90	64.5841	63.8866	0.4866	303	110.0000	109.1233	0.7686
91	68.1689	67.6843	0.2349	304	110.0000	108.9733	1.0541
92	70.3779	69.8101	0.3224	305	110.0000	109.1511	0.7207
93	71.7711	71.3405	0.1854	306	110.0000	109.0778	0.8504
94	72.6064	71.9318	0.4551	307	110.0000	109.0194	0.9615
95	73.9122	73.0349	0.7696	308	110.0000	109.1776	0.6764
96	75.7597	74.9836	0.6023	309	110.0000	108.9966	1.0067
97	78.2239	77.2957	0.8616	310	110.0000	109.0603	0.8831
98	80.8128	80.0782	0.5396	311	110.0000	109.1548	0.7143
99	83.5347	82.9449	0.3479	312	110.0000	108.9862	1.0278
100	85.4093	84.6318	0.6045	313	110.0000	109.0967	0.8160
101	86.7133	86.0230	0.4766	314	110.0000	109.1099	0.7923
102	88.0100	87.1677	0.7096	315	110.0000	108.9922	1.0157
103	89.6166	88.6102	1.0127	316	110.0000	109.1673	0.6934
104	91.6639	90.8142	0.7220	317	110.0000	109.0417	0.9184
105	93.8752	92.9502	0.8555	318	110.0000	109.0340	0.9331
106	96.5912	95.7183	0.7620	319	110.0000	109.1611	0.7038
107	98.7265	97.9793	0.5584	320	110.0000	109.0096	0.9809
108	100.4911	99.5586	0.8695	321	110.0000	109.0682	0.8683
109	101.8671	100.9933	0.7636	322	110.0000	109.1373	0.7443
110	103.4885	102.5805	0.8245	323	110.0000	108.9933	1.0134
111	105.1366	104.1272	1.0188	324	110.0000	109.1122	0.7882
112	106.5118	105.6658	0.7158	325	110.0000	109.0882	0.8313
113	107.7832	106.7929	0.9806	326	110.0000	109.0042	0.9916
114	108.9722	108.0249	0.8975	327	110.0000	109.1396	0.7403
115	109.9309	109.0975	0.6945	328	110.0000	109.0529	0.8970
116	110.6778	109.6978	0.9604	329	110.0000	109.0546	0.8938
117	111.2135	110.2969	0.8401	330	110.0000	109.1326	0.7523
118	111.5988	110.7284	0.7576	331	110.0000	108.9839	1.0325



119	111.7945	110.7882	1.0127	332	110.0000	109.1279	0.7605
120	111.8685	110.9949	0.7632	333	110.0000	109.0850	0.8373
121	111.9111	110.9550	0.9142	334	110.0000	109.0001	0.9998
122	111.9603	110.9890	0.9433	335	110.0000	109.1395	0.7405
123	111.9938	111.1351	0.7375	336	110.0000	109.0594	0.8848
124	111.9891	110.9659	1.0469	337	110.0000	109.0487	0.9049
125	111.9293	111.0355	0.7989	338	110.0000	109.1434	0.7338
126	111.7902	110.9003	0.7918	339	110.0000	108.9846	1.0309
127	111.6008	110.5954	1.0108	340	110.0000	109.1139	0.7852
128	111.3685	110.5050	0.7457	341	110.0000	109.0965	0.8163
129	111.1073	110.1787	0.8623	342	110.0000	108.9953	1.0095
130	110.8572	109.8665	0.9816	343	110.0000	109.1378	0.7434
131	110.6505	109.7935	0.7344	344	110.0000	109.0651	0.8740
132	110.5025	109.5187	0.9679	345	110.0000	109.0454	0.9112
133	110.3921	109.4551	0.8781	346	110.0000	109.1518	0.7195
134	110.3174	109.4527	0.7477	347	110.0000	108.9840	1.0323
135	110.2476	109.2597	0.9760	348	110.0000	109.1040	0.8027
136	110.1637	109.2630	0.8113	349	110.0000	109.1059	0.7994
137	110.0511	109.1416	0.8271	350	110.0000	108.9897	1.0206
138	109.9303	108.9542	0.9527	351	110.0000	109.1392	0.7410
139	109.8414	109.0018	0.7049	352	110.0000	109.0691	0.8667
140	109.7820	108.7873	0.9894	353	110.0000	109.0403	0.9210
141	109.7526	108.8207	0.8686	354	110.0000	109.1603	0.7050
142	109.7520	108.8849	0.7517	355	110.0000	108.9840	1.0323
143	109.7719	108.7626	1.0186	356	110.0000	109.0930	0.8226
144	109.7994	108.9175	0.7778	357	110.0000	109.1155	0.7824
145	109.8252	108.9142	0.8300	358	110.0000	108.9856	1.0291
146	109.8392	108.8455	0.9874	359	110.0000	109.1633	0.7000
147	109.8440	108.9799	0.7467	360	110.0000	109.0532	0.8963
148	109.8434	108.9064	0.8780	361	110.0000	109.0283	0.9441
149	109.8439	108.8970	0.8968	362	110.0000	109.1622	0.7018
150	109.8539	108.9937	0.7400	363	110.0000	108.9833	1.0336
151	109.8742	108.8565	1.0359	364	110.0000	109.0893	0.8293
152	109.9016	109.0186	0.7797	365	110.0000	109.1194	0.7755
153	109.9335	109.0274	0.8211	366	110.0000	108.9814	1.0375
154	109.9601	108.9565	1.0073	367	110.0000	109.1594	0.7067
155	109.9805	109.1159	0.7475	368	110.0000	109.0616	0.8807
156	109.9935	109.0637	0.8645	369	110.0000	109.0253	0.9500
157	109.9990	109.0446	0.9108	370	110.0000	109.1661	0.6954
158	109.9976	109.1546	0.7106	371	110.0000	108.9901	1.0199

159	109.9960	108.9778	1.0367	372	110.0000	109.0794	0.8475
160	109.9976	109.0957	0.8134	373	110.0000	109.1209	0.7728
161	110.0035	109.1146	0.7902	374	110.0000	108.9780	1.0445
162	110.0134	109.0029	1.0210	375	110.0000	109.1535	0.7166
163	110.0216	109.1911	0.6897	376	110.0000	109.0702	0.8645
164	110.0276	109.0708	0.9155	377	110.0000	109.0239	0.9528
165	110.0302	109.0612	0.9390	378	110.0000	109.1702	0.6885
166	110.0288	109.1930	0.6986	379	110.0000	108.9937	1.0127
167	110.0246	109.0359	0.9775	380	110.0000	109.0716	0.8619
168	110.0188	109.0828	0.8762	381	110.0000	109.1241	0.7672
169	110.0135	109.1559	0.7355	382	110.0000	108.9720	1.0568
170	110.0099	109.0054	1.0089	383	110.0000	109.1505	0.7216
171	110.0085	109.1099	0.8074	384	110.0000	109.0799	0.8466
172	110.0090	109.1033	0.8203	385	110.0000	109.0180	0.9643
173	110.0104	109.0113	0.9983	386	110.0000	109.1799	0.6725
174	110.0113	109.1552	0.7329	387	110.0000	108.9973	1.0053
175	110.0108	109.0621	0.9001	388	110.0000	109.0569	0.8895
176	110.0083	109.0602	0.8989	389	110.0000	109.1586	0.7080
177	110.0043	109.1399	0.7472	390	110.0000	108.9888	1.0226
178	110.0008	108.9827	1.0365	391	110.0000	109.0892	0.8296
179	109.9982	109.1236	0.7650	392	110.0000	109.1137	0.7855
180	109.9969	109.0860	0.8297	393	110.0000	108.9869	1.0264
181	109.9968	108.9914	1.0108	394	110.0000	109.1606	0.7046
182	109.9975	109.1232	0.7645	395	110.0000	109.0534	0.8960
183	109.9986	109.0780	0.8476	396	110.0000	109.0311	0.9388
184	109.9996	109.0130	0.9734	397	110.0000	109.1595	0.7065
185	109.9999	109.1426	0.7350	398	110.0000	108.9830	1.0343
186	109.9995	109.0384	0.9237	399	110.0000	109.0933	0.8222
187	109.9985	109.0627	0.8757	400	110.0000	109.1163	0.7809
188	109.9974	109.1295	0.7533	401	110.0000	108.9848	1.0307
189	109.9967	109.0004	0.9925	402	110.0000	109.1633	0.7000
190	109.9965	109.1042	0.7962	403	110.0000	109.0543	0.8944
191	109.9971	109.0774	0.8458	404	110.0000	109.0275	0.9458
192	109.9981	109.0130	0.9705	405	110.0000	109.1632	0.7002
193	109.9991	109.1405	0.7372	406	110.0000	108.9844	1.0314
194	109.9999	109.0374	0.9264	407	110.0000	109.0873	0.8331
195	110.0002	109.0669	0.8711	408	110.0000	109.1200	0.7744
196	110.0001	109.1299	0.7572	409	110.0000	108.9806	1.0391
197	109.9997	109.0048	0.9899	410	110.0000	109.1577	0.7095
198	109.9993	109.1081	0.7942	411	110.0000	109.0638	0.8764



199	109.9990	109.0771	0.8500	412	110.0000	109.0251	0.9504
200	109.9991	109.0162	0.9662	413	110.0000	109.1668	0.6942
201	109.9994	109.1395	0.7395	414	110.0000	108.9913	1.0175
202	109.9999	109.0365	0.9282	415	110.0000	109.0776	0.8508
203	110.0004	109.0693	0.8670	416	110.0000	109.1212	0.7722
204	110.0007	109.1284	0.7609	417	110.0000	108.9770	1.0465
205	110.0007	109.0071	0.9873	418	110.0000	109.1528	0.7177
206	110.0006	109.1102	0.7928	419	110.0000	109.0719	0.8614
207	110.0003	109.0762	0.8539	420	110.0000	109.0231	0.9544
208	110.0000	109.0190	0.9623	421	110.0000	109.1716	0.6862
209	109.9998	109.1386	0.7417	422	110.0000	108.9944	1.0113
210	109.9998	109.0359	0.9292	423	110.0000	109.0694	0.8661
211	110.0000	109.0708	0.8635	424	110.0000	109.1255	0.7647
212	110.0002	109.1261	0.7641	425	110.0000	109.0034	0.9933
213	110.0003	109.0079	0.9850				

Lampiran 3. Data untuk perhitungan nilai *RMSE* pada *duty cycle* 0,83

No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error	No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error
1	0.0000	0.0000	0.0000	202	110.0000	109.1638	0.6992
2	0.0000	0.0000	0.0000	203	110.0003	109.2099	0.6247
3	0.0000	0.0000	0.0000	204	110.0004	109.0584	0.8875
4	0.0000	0.0000	0.0000	205	110.0004	109.2459	0.5693
5	0.0004	0.0000	0.0000	206	110.0003	109.1544	0.7155
6	0.0100	0.0000	0.0001	207	110.0001	109.1083	0.7952
7	0.2450	0.0022	0.0589	208	109.9999	109.2599	0.5476
8	1.0968	0.0447	1.1071	209	109.9998	109.0722	0.8604
9	3.2225	0.4064	7.9308	210	109.9998	109.1635	0.6994
10	7.0639	2.2493	23.1810	211	109.9999	109.2096	0.6246
11	11.1260	7.5067	13.0988	212	110.0000	109.0579	0.8877
12	12.4531	15.3909	8.6307	213	110.0001	109.2455	0.5694
13	10.6882	19.5113	77.8482	214	110.0002	109.1545	0.7152
14	5.5176	15.5899	101.4512	215	110.0001	109.1083	0.7954
15	-0.0273	2.5291	6.5349	216	110.0000	109.2602	0.5474
16	-4.1099	-10.3174	38.5336	217	109.9999	109.0725	0.8602
17	-6.7600	-17.7978	121.8345	218	109.9999	109.1633	0.6998
18	-6.3357	-12.5295	38.3626	219	109.9999	109.2097	0.6244
19	-3.8425	-2.6864	1.3365	220	109.9999	109.0575	0.8881
20	0.2905	6.3744	37.0141	221	110.0000	109.2452	0.5696
21	4.6644	8.3369	13.4874	222	110.0000	109.1547	0.7147



22	7.2260	6.0592	1.3613	223	110.0001	109.1080	0.7957
23	8.8269	4.9583	14.9658	224	110.0001	109.2605	0.5470
24	9.4482	8.5486	0.8093	225	110.0000	109.0727	0.8599
25	9.6431	12.2855	6.9820	226	110.0000	109.1630	0.7006
26	10.0057	12.7974	7.7937	227	109.9999	109.2100	0.6240
27	10.5271	9.5736	0.9092	228	109.9999	109.0572	0.8888
28	10.9060	7.7495	9.9639	229	110.0000	109.2450	0.5700
29	10.8695	9.3830	2.2096	230	110.0000	109.1553	0.7136
30	10.1943	12.3612	4.6954	231	110.0000	109.1076	0.7964
31	8.9064	12.3838	12.0922	232	110.0000	109.2610	0.5462
32	7.4140	8.4303	1.0329	233	110.0000	109.0731	0.8593
33	6.0386	3.7012	5.4638	234	110.0000	109.1621	0.7021
34	5.0350	2.0607	8.8462	235	110.0000	109.2106	0.6232
35	5.0112	4.8469	0.0270	236	110.0000	109.0564	0.8903
36	5.8867	7.4546	2.4583	237	110.0000	109.2446	0.5706
37	7.5722	8.0101	0.1918	238	110.0000	109.1565	0.7114
38	9.7534	7.9676	3.1893	239	110.0000	109.1069	0.7977
39	12.2104	10.3701	3.3870	240	110.0000	109.2621	0.5445
40	14.4877	15.3052	0.6682	241	110.0000	109.0736	0.8582
41	15.8305	17.9628	4.5467	242	110.0000	109.1602	0.7052
42	16.4815	17.3587	0.7694	243	110.0000	109.2117	0.6215
43	16.4438	15.4001	1.0894	244	110.0000	109.0548	0.8934
44	15.8144	14.8906	0.8535	245	110.0000	109.2438	0.5718
45	14.9622	15.7132	0.5639	246	110.0000	109.1592	0.7069
46	14.2646	15.1473	0.7791	247	110.0000	109.1053	0.8005
47	13.9073	12.9411	0.9335	248	110.0000	109.2645	0.5409
48	14.1277	12.5614	2.4533	249	110.0000	109.0747	0.8561
49	14.8483	14.4647	0.1471	250	110.0000	109.1563	0.7118
50	15.9660	16.6209	0.4288	251	110.0000	109.2141	0.6177
51	17.3874	17.4140	0.0007	252	110.0000	109.0511	0.9004
52	18.8378	17.8772	0.9227	253	110.0000	109.2422	0.5743
53	20.2383	19.8721	0.1341	254	110.0000	109.1651	0.6971
54	21.2296	21.9163	0.4715	255	110.0000	109.1015	0.8074
55	21.8857	22.1004	0.0461	256	110.0000	109.2705	0.5321
56	22.3106	21.5038	0.6510	257	110.0000	109.0770	0.8519
57	22.7522	22.2368	0.2657	258	110.0000	109.1472	0.7273
58	23.4381	23.6000	0.0262	259	110.0000	109.2206	0.6075
59	24.5518	24.2185	0.1111	260	110.0000	109.0406	0.9205
60	25.9453	25.0901	0.7313	261	110.0000	109.2389	0.5792
61	27.5946	27.4483	0.0214	262	110.0000	109.1805	0.6717



62	28.8974	29.2233	0.1062	263	110.0000	109.0637	0.8767
63	29.7659	29.5879	0.0317	264	110.0000	109.2460	0.5685
64	30.1373	29.7181	0.1758	265	110.0000	109.1481	0.7257
65	30.1622	30.1530	0.0001	266	110.0000	109.1130	0.7868
66	30.1744	30.0747	0.0099	267	110.0000	109.2538	0.5569
67	30.6099	29.8265	0.6137	268	110.0000	109.0688	0.8671
68	31.8364	30.9590	0.7699	269	110.0000	109.1744	0.6816
69	34.1284	33.6917	0.1907	270	110.0000	109.2040	0.6336
70	37.1431	36.6750	0.2191	271	110.0000	109.0659	0.8725
71	40.2981	39.8254	0.2235	272	110.0000	109.2518	0.5598
72	42.9184	43.0129	0.0089	273	110.0000	109.1391	0.7411
73	44.1318	44.2623	0.0170	274	110.0000	109.1148	0.7835
74	44.2822	43.9746	0.0946	275	110.0000	109.2502	0.5622
75	43.8817	43.5175	0.1326	276	110.0000	109.0629	0.8782
76	43.6945	43.2361	0.2102	277	110.0000	109.1834	0.6669
77	44.6613	43.7146	0.8961	278	110.0000	109.2025	0.6361
78	46.8756	46.0213	0.7299	279	110.0000	109.0688	0.8671
79	50.2300	49.7741	0.2078	280	110.0000	109.2593	0.5486
80	53.6826	53.2729	0.1679	281	110.0000	109.1299	0.7571
81	56.2550	56.0271	0.0519	282	110.0000	109.1148	0.7836
82	57.9078	57.7390	0.0285	283	110.0000	109.2497	0.5630
83	58.4265	57.8584	0.3228	284	110.0000	109.0530	0.8968
84	59.3311	58.6396	0.4782	285	110.0000	109.1912	0.6542
85	61.7792	60.9626	0.6668	286	110.0000	109.2063	0.6299
86	64.6241	63.7949	0.6876	287	110.0000	109.0609	0.8819
87	67.5802	67.2311	0.1219	288	110.0000	109.2238	0.6025
88	69.8871	69.5288	0.1284	289	110.0000	109.1701	0.6887
89	71.6776	71.0849	0.3513	290	110.0000	109.0837	0.8396
90	72.6321	72.1787	0.2056	291	110.0000	109.2397	0.5781
91	73.5901	72.8247	0.5858	292	110.0000	109.1295	0.7577
92	75.2655	74.2976	0.9368	293	110.0000	109.1365	0.7457
93	77.8134	77.1594	0.4277	294	110.0000	109.2344	0.5862
94	80.3558	79.6135	0.5510	295	110.0000	109.0828	0.8412
95	82.8259	82.1504	0.4563	296	110.0000	109.1855	0.6635
96	84.8117	84.3555	0.2081	297	110.0000	109.1789	0.6743
97	86.3026	85.5751	0.5292	298	110.0000	109.0984	0.8128
98	87.6406	86.7969	0.7118	299	110.0000	109.2578	0.5509
99	89.1369	88.3818	0.5701	300	110.0000	109.0926	0.8233
100	91.0257	90.0919	0.8719	301	110.0000	109.1491	0.7240
101	93.5792	92.7109	0.7539	302	110.0000	109.2341	0.5866

102	95.8901	95.1961	0.4817	303	110.0000	109.0762	0.8533
103	97.9966	97.1937	0.6447	304	110.0000	109.1905	0.6553
104	99.9095	99.1287	0.6096	305	110.0000	109.1816	0.6697
105	102.1816	101.3797	0.6431	306	110.0000	109.0829	0.8410
106	103.9343	103.0221	0.8321	307	110.0000	109.2343	0.5864
107	105.4397	104.6484	0.6261	308	110.0000	109.1341	0.7497
108	106.9193	106.0032	0.8393	309	110.0000	109.1383	0.7425
109	108.3255	107.4970	0.6865	310	110.0000	109.2213	0.6064
110	109.8808	109.0432	0.7016	311	110.0000	109.0613	0.8812
111	110.7700	109.8954	0.7650	312	110.0000	109.2221	0.6051
112	111.2982	110.5758	0.5220	313	110.0000	109.1701	0.6888
113	111.6242	110.6953	0.8627	314	110.0000	109.0831	0.8407
114	111.7842	110.9519	0.6927	315	110.0000	109.2380	0.5807
115	111.8591	111.0640	0.6322	316	110.0000	109.1325	0.7526
116	111.8780	110.9158	0.9260	317	110.0000	109.1357	0.7471
117	111.8999	111.1287	0.5948	318	110.0000	109.2237	0.6026
118	111.9333	111.0738	0.7388	319	110.0000	109.0590	0.8855
119	111.9464	111.0501	0.8032	320	110.0000	109.2206	0.6075
120	111.8758	111.1496	0.5274	321	110.0000	109.1742	0.6820
121	111.7158	110.8026	0.8340	322	110.0000	109.0784	0.8494
122	111.4842	110.6499	0.6960	323	110.0000	109.2331	0.5882
123	111.1409	110.3518	0.6226	324	110.0000	109.1436	0.7334
124	110.8512	109.9016	0.9018	325	110.0000	109.1309	0.7553
125	110.6284	109.8646	0.5834	326	110.0000	109.2349	0.5854
126	110.4704	109.6158	0.7303	327	110.0000	109.0645	0.8752
127	110.3473	109.4508	0.8037	328	110.0000	109.2027	0.6357
128	110.2769	109.5355	0.5496	329	110.0000	109.1837	0.6663
129	110.2176	109.2924	0.8561	330	110.0000	109.0769	0.8521
130	110.1428	109.3168	0.6823	331	110.0000	109.2278	0.5962
131	110.0322	109.2462	0.6177	332	110.0000	109.1492	0.7238
132	109.9202	108.9823	0.8796	333	110.0000	109.1315	0.7543
133	109.8329	109.0795	0.5676	334	110.0000	109.2391	0.5789
134	109.7740	108.9203	0.7288	335	110.0000	109.0640	0.8762
135	109.7452	108.8524	0.7972	336	110.0000	109.1984	0.6426
136	109.7562	109.0089	0.5585	337	110.0000	109.1881	0.6592
137	109.7862	108.8538	0.8693	338	110.0000	109.0745	0.8566
138	109.8194	108.9933	0.6824	339	110.0000	109.2295	0.5936
139	109.8483	109.0580	0.6246	340	110.0000	109.1497	0.7229
140	109.8615	108.9273	0.8727	341	110.0000	109.1293	0.7581
141	109.8623	109.1147	0.5589	342	110.0000	109.2417	0.5750



142	109.8597	109.0045	0.7314	343	110.0000	109.0641	0.8759
143	109.8616	108.9720	0.7914	344	110.0000	109.1949	0.6483
144	109.8754	109.1277	0.5590	345	110.0000	109.1911	0.6544
145	109.8988	108.9638	0.8743	346	110.0000	109.0728	0.8597
146	109.9286	109.1025	0.6824	347	110.0000	109.2301	0.5928
147	109.9628	109.1690	0.6302	348	110.0000	109.1508	0.7212
148	109.9899	109.0554	0.8733	349	110.0000	109.1278	0.7608
149	110.0030	109.2565	0.5574	350	110.0000	109.2441	0.5714
150	110.0066	109.1494	0.7347	351	110.0000	109.0641	0.8759
151	110.0038	109.1165	0.7872	352	110.0000	109.1918	0.6532
152	109.9994	109.2519	0.5587	353	110.0000	109.1938	0.6500
153	109.9988	109.0631	0.8754	354	110.0000	109.0711	0.8629
154	110.0030	109.1794	0.6783	355	110.0000	109.2301	0.5928
155	110.0122	109.2163	0.6334	356	110.0000	109.1525	0.7182
156	110.0228	109.0886	0.8729	357	110.0000	109.1262	0.7636
157	110.0292	109.2834	0.5563	358	110.0000	109.2472	0.5667
158	110.0309	109.1698	0.7414	359	110.0000	109.0640	0.8761
159	110.0274	109.1416	0.7846	360	110.0000	109.1880	0.6594
160	110.0198	109.2713	0.5601	361	110.0000	109.1972	0.6444
161	110.0127	109.0751	0.8791	362	110.0000	109.0753	0.8552
162	110.0075	109.1891	0.6698	363	110.0000	109.2649	0.5403
163	110.0051	109.2084	0.6347	364	110.0000	109.1175	0.7789
164	110.0058	109.0726	0.8708	365	110.0000	109.1194	0.7755
165	110.0078	109.2654	0.5512	366	110.0000	109.2533	0.5576
166	110.0095	109.1429	0.7510	367	110.0000	109.0930	0.8226
167	110.0097	109.1238	0.7848	368	110.0000	109.1523	0.7186
168	110.0074	109.2586	0.5608	369	110.0000	109.2278	0.5963
169	110.0041	109.0617	0.8881	370	110.0000	109.0756	0.8544
170	110.0005	109.1870	0.6617	371	110.0000	109.1998	0.6404
171	109.9973	109.2027	0.6314	372	110.0000	109.1739	0.6825
172	109.9957	109.0609	0.8739	373	110.0000	109.0880	0.8317
173	109.9960	109.2584	0.5440	374	110.0000	109.2303	0.5924
174	109.9973	109.1290	0.7539	375	110.0000	109.1336	0.7506
175	109.9990	109.1086	0.7928	376	110.0000	109.1430	0.7344
176	110.0003	109.2561	0.5540	377	110.0000	109.2142	0.6174
177	110.0004	109.0567	0.8906	378	110.0000	109.0633	0.8774
178	109.9997	109.1812	0.6700	379	110.0000	109.2295	0.5937
179	109.9984	109.2099	0.6217	380	110.0000	109.1611	0.7037
180	109.9970	109.0562	0.8852	381	110.0000	109.0931	0.8225
181	109.9966	109.2522	0.5540	382	110.0000	109.2468	0.5672



182	109.9968	109.1417	0.7313	383	110.0000	109.1086	0.7946
183	109.9979	109.1032	0.8004	384	110.0000	109.1475	0.7267
184	109.9992	109.2590	0.5480	385	110.0000	109.2368	0.5825
185	110.0002	109.0698	0.8657	386	110.0000	109.1255	0.7647
186	110.0006	109.1667	0.6955	387	110.0000	109.1369	0.7450
187	110.0005	109.2114	0.6227	388	110.0000	109.2241	0.6020
188	110.0000	109.0581	0.8871	389	110.0000	109.0969	0.8155
189	109.9994	109.2448	0.5695	390	110.0000	109.1826	0.6681
190	109.9991	109.1531	0.7157	391	110.0000	109.1657	0.6961
191	109.9991	109.1073	0.7952	392	110.0000	109.1150	0.7833
192	109.9995	109.2593	0.5478	393	110.0000	109.2482	0.5652
193	110.0000	109.0724	0.8604	394	110.0000	109.0789	0.8484
194	110.0005	109.1644	0.6991	395	110.0000	109.1732	0.6836
195	110.0008	109.2104	0.6247	396	110.0000	109.1941	0.6495
196	110.0008	109.0588	0.8873	397	110.0000	109.0744	0.8568
197	110.0005	109.2460	0.5692	398	110.0000	109.2534	0.5575
198	110.0002	109.1542	0.7157	399	110.0000	109.1265	0.7629
199	109.9998	109.1081	0.7952	400	110.0000	109.1242	0.7671
200	109.9997	109.2596	0.5478	401	110.0000	109.1613	0.7035
201	109.9998	109.0722	0.8605				

Lampiran 4. Data untuk perhitungan nilai *RMSE* pada *duty cycle* 0,846

No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error	No	PID <i>real</i>	PID pemodelan	Error
1	0.0000	0.0000	0.0000	204	110.0001	109.1316	0.7543
2	0.0000	0.0000	0.0000	205	110.0001	109.2773	0.5224
3	0.0000	0.0000	0.0000	206	110.0001	109.0920	0.8246
4	0.0000	0.0000	0.0000	207	110.0000	109.1939	0.6499
5	0.0004	0.0000	0.0000	208	110.0000	109.2301	0.5928
6	0.0100	0.0000	0.0001	209	110.0000	109.0873	0.8331
7	0.2488	0.0024	0.0607	210	110.0000	109.2688	0.5346
8	1.1023	0.0475	1.1124	211	110.0000	109.1697	0.6895
9	3.2264	0.4290	7.8254	212	110.0000	109.1356	0.7472
10	7.0638	2.3582	22.1422	213	110.0000	109.2740	0.5271
11	11.1506	7.8468	10.9151	214	110.0000	109.0938	0.8212
12	12.4621	15.5819	9.7330	215	110.0000	109.1967	0.6452
13	10.7426	19.4689	76.1488	216	110.0000	109.2255	0.5998
14	5.5116	15.0162	90.3368	217	110.0000	109.0919	0.8247
15	-0.0568	1.9769	4.1360	218	110.0000	109.2718	0.5303
16	-4.2472	-10.4840	38.8969	219	110.0000	109.1613	0.7033

17	-7.1060	-17.4432	106.8572	220	110.0000	109.1398	0.7400
18	-6.8341	-12.2355	29.1754	221	110.0000	109.2684	0.5352
19	-4.4606	-3.0968	1.8598	222	110.0000	109.0873	0.8330
20	-0.2076	5.2244	29.5061	223	110.0000	109.2088	0.6260
21	4.0634	6.8234	7.6175	224	110.0000	109.2218	0.6056
22	6.7262	5.2522	2.1727	225	110.0000	109.0972	0.8150
23	8.4471	5.3050	9.8729	226	110.0000	109.2835	0.5134
24	8.9944	8.9778	0.0003	227	110.0000	109.1458	0.7296
25	9.1408	11.9557	7.9237	228	110.0000	109.1407	0.7383
26	9.4345	11.6710	5.0020	229	110.0000	109.2734	0.5279
27	10.0075	8.7515	1.5776	230	110.0000	109.1174	0.7790
28	10.6066	7.5068	9.6085	231	110.0000	109.1758	0.6793
29	10.8886	9.6665	1.4934	232	110.0000	109.2474	0.5664
30	10.5337	12.8055	5.1611	233	110.0000	109.1004	0.8093
31	9.3931	12.8044	11.6371	234	110.0000	109.2235	0.6030
32	7.4595	7.6343	0.0305	235	110.0000	109.1943	0.6492
33	5.8478	3.2865	6.5602	236	110.0000	109.1135	0.7858
34	4.5441	2.2433	5.2936	237	110.0000	109.2479	0.5657
35	4.0766	4.2997	0.0498	238	110.0000	109.1598	0.7059
36	4.5812	5.9062	1.7554	239	110.0000	109.1671	0.6938
37	5.9486	5.7755	0.0300	240	110.0000	109.2351	0.5850
38	7.9422	5.9028	4.1589	241	110.0000	109.0913	0.8258
39	10.6629	9.2502	1.9956	242	110.0000	109.2489	0.5642
40	13.0583	14.1474	1.1861	243	110.0000	109.1816	0.6698
41	14.7550	16.5904	3.3688	244	110.0000	109.1459	0.7295
42	15.8173	15.7418	0.0057	245	110.0000	109.2781	0.5211
43	15.8980	14.7789	1.2524	246	110.0000	109.0871	0.8334
44	15.4062	15.2302	0.0310	247	110.0000	109.1987	0.6421
45	14.5893	15.6643	1.1556	248	110.0000	109.2309	0.5916
46	13.6068	13.9714	0.1329	249	110.0000	109.0869	0.8338
47	12.9766	11.7762	1.4410	250	110.0000	109.2720	0.5299
48	12.8366	11.7522	1.1759	251	110.0000	109.1677	0.6927
49	13.2991	13.5535	0.0648	252	110.0000	109.1339	0.7501
50	14.2496	14.5692	0.1022	253	110.0000	109.2751	0.5255
51	15.7373	14.9081	0.6875	254	110.0000	109.0932	0.8223
52	17.1945	16.3753	0.6711	255	110.0000	109.1957	0.6468
53	18.8308	19.2493	0.1752	256	110.0000	109.2271	0.5974
54	19.9259	20.4219	0.2460	257	110.0000	109.0902	0.8277
55	20.7805	20.2808	0.2497	258	110.0000	109.2708	0.5317
56	21.1789	20.7087	0.2211	259	110.0000	109.1642	0.6985

57	21.4678	21.7123	0.0598	260	110.0000	109.1383	0.7425
58	21.8213	21.7563	0.0042	261	110.0000	109.2704	0.5323
59	22.5185	21.7116	0.6511	262	110.0000	109.0898	0.8285
60	23.5499	23.0887	0.2127	263	110.0000	109.2044	0.6330
61	24.8781	25.0008	0.0150	264	110.0000	109.2230	0.6037
62	26.2850	26.0402	0.0599	265	110.0000	109.0956	0.8180
63	27.3172	26.9105	0.1654	266	110.0000	109.2783	0.5208
64	27.9337	28.0195	0.0074	267	110.0000	109.1517	0.7196
65	28.1813	28.2919	0.0122	268	110.0000	109.1412	0.7375
66	28.2834	27.8183	0.2163	269	110.0000	109.2716	0.5306
67	28.5954	28.0098	0.3429	270	110.0000	109.1154	0.7825
68	29.8289	29.4760	0.1246	271	110.0000	109.1801	0.6722
69	31.8473	31.1594	0.4733	272	110.0000	109.2420	0.5745
70	34.4160	33.7566	0.4349	273	110.0000	109.0986	0.8126
71	37.2341	37.1240	0.0121	274	110.0000	109.2333	0.5879
72	39.5475	39.5386	0.0001	275	110.0000	109.1874	0.6604
73	41.0802	40.9052	0.0306	276	110.0000	109.1172	0.7793
74	41.1266	41.1709	0.0020	277	110.0000	109.2500	0.5626
75	40.6624	40.4216	0.0580	278	110.0000	109.1541	0.7156
76	40.3538	39.6391	0.5107	279	110.0000	109.1700	0.6889
77	40.9927	40.3326	0.4356	280	110.0000	109.2430	0.5731
78	43.0927	42.3932	0.4894	281	110.0000	109.1073	0.7969
79	46.0494	45.2907	0.5757	282	110.0000	109.2230	0.6038
80	49.2887	48.9519	0.1135	283	110.0000	109.1870	0.6610
81	52.4019	52.3030	0.0098	284	110.0000	109.1208	0.7729
82	54.2375	53.9234	0.0987	285	110.0000	109.2455	0.5693
83	54.7495	54.4973	0.0636	286	110.0000	109.1546	0.7147
84	55.0456	54.4933	0.3050	287	110.0000	109.1745	0.6815
85	56.3069	55.4741	0.6935	288	110.0000	109.2203	0.6080
86	58.5066	57.8772	0.3961	289	110.0000	109.0924	0.8236
87	62.0176	61.3746	0.4134	290	110.0000	109.2659	0.5390
88	64.7802	64.4042	0.1414	291	110.0000	109.1645	0.6981
89	66.9954	66.6768	0.1015	292	110.0000	109.1434	0.7338
90	67.9750	67.3595	0.3788	293	110.0000	109.2656	0.5394
91	69.0781	68.4850	0.3518	294	110.0000	109.0891	0.8297
92	70.6307	69.8000	0.6900	295	110.0000	109.2113	0.6221
93	72.9422	72.1201	0.6759	296	110.0000	109.2177	0.6121
94	76.0834	75.5783	0.2551	297	110.0000	109.0953	0.8184
95	78.3688	77.7498	0.3832	298	110.0000	109.2501	0.5624
96	80.1153	79.5856	0.2805	299	110.0000	109.1767	0.6778

97	81.5962	81.0169	0.3355	300	110.0000	109.1492	0.7238
98	83.0129	82.1507	0.7435	301	110.0000	109.2683	0.5353
99	84.6727	83.9124	0.5780	302	110.0000	109.0895	0.8291
100	86.8472	86.0269	0.6728	303	110.0000	109.2089	0.6259
101	89.9592	89.2129	0.5570	304	110.0000	109.2194	0.6093
102	92.6209	92.0097	0.3735	305	110.0000	109.1001	0.8098
103	94.3471	93.5620	0.6163	306	110.0000	109.2836	0.5133
104	95.7611	95.0403	0.5196	307	110.0000	109.1420	0.7361
105	97.3216	96.4798	0.7086	308	110.0000	109.1439	0.7329
106	99.1766	98.2754	0.8123	309	110.0000	109.2720	0.5300
107	101.2301	100.4767	0.5676	310	110.0000	109.1174	0.7790
108	103.0530	102.1936	0.7385	311	110.0000	109.1771	0.6771
109	104.7106	103.9462	0.5842	312	110.0000	109.2452	0.5698
110	106.4194	105.6192	0.6403	313	110.0000	109.1003	0.8094
111	107.4431	106.5865	0.7338	314	110.0000	109.2267	0.5981
112	108.3171	107.5639	0.5672	315	110.0000	109.1915	0.6537
113	109.1353	108.2513	0.7815	316	110.0000	109.1129	0.7869
114	109.8386	109.0325	0.6497	317	110.0000	109.2396	0.5782
115	110.5536	109.7394	0.6628	318	110.0000	109.1704	0.6882
116	110.9901	110.1199	0.7573	319	110.0000	109.1661	0.6954
117	111.2563	110.5343	0.5212	320	110.0000	109.2465	0.5678
118	111.4186	110.5236	0.8009	321	110.0000	109.0898	0.8285
119	111.4974	110.6809	0.6667	322	110.0000	109.2375	0.5814
120	111.4980	110.7231	0.6005	323	110.0000	109.1937	0.6501
121	111.4261	110.5132	0.8333	324	110.0000	109.1084	0.7949
122	111.3264	110.5934	0.5372	325	110.0000	109.2511	0.5609
123	111.2186	110.3805	0.7024	326	110.0000	109.1632	0.7003
124	111.0920	110.2258	0.7502	327	110.0000	109.1604	0.7049
125	110.9574	110.2302	0.5287	328	110.0000	109.2457	0.5689
126	110.8324	109.9241	0.8250	329	110.0000	109.0901	0.8280
127	110.7052	109.9050	0.6404	330	110.0000	109.2366	0.5828
128	110.5616	109.7870	0.6000	331	110.0000	109.1942	0.6494
129	110.4207	109.5130	0.8241	332	110.0000	109.1078	0.7960
130	110.3113	109.5842	0.5286	333	110.0000	109.2490	0.5640
131	110.2170	109.3754	0.7082	334	110.0000	109.1662	0.6953
132	110.1270	109.2668	0.7399	335	110.0000	109.1599	0.7057
133	110.0482	109.3154	0.5370	336	110.0000	109.2483	0.5650
134	109.9973	109.0809	0.8397	337	110.0000	109.0906	0.8270
135	109.9582	109.1703	0.6208	338	110.0000	109.2331	0.5881
136	109.9250	109.1482	0.6034	339	110.0000	109.1967	0.6454

137	109.9025	108.9932	0.8268	340	110.0000	109.1043	0.8023
138	109.8871	109.1348	0.5658	341	110.0000	109.2333	0.5879
139	109.8776	109.0623	0.6648	342	110.0000	109.1864	0.6619
140	109.8737	108.9930	0.7755	343	110.0000	109.1254	0.7649
141	109.8747	109.1394	0.5407	344	110.0000	109.2516	0.5601
142	109.8797	109.0126	0.7520	345	110.0000	109.1404	0.7389
143	109.8883	109.0617	0.6833	346	110.0000	109.1809	0.6709
144	109.8978	109.1485	0.5614	347	110.0000	109.2386	0.5797
145	109.9086	109.0333	0.7661	348	110.0000	109.1217	0.7713
146	109.9212	109.1122	0.6545	349	110.0000	109.2077	0.6278
147	109.9370	109.1351	0.6430	350	110.0000	109.1852	0.6639
148	109.9496	109.0631	0.7859	351	110.0000	109.1480	0.7258
149	109.9602	109.2352	0.5256	352	110.0000	109.2664	0.5381
150	109.9693	109.0979	0.7593	353	110.0000	109.0948	0.8194
151	109.9778	109.1432	0.6967	354	110.0000	109.2068	0.6292
152	109.9846	109.2447	0.5475	355	110.0000	109.2155	0.6154
153	109.9906	109.1158	0.7653	356	110.0000	109.1045	0.8020
154	109.9964	109.1768	0.6717	357	110.0000	109.2808	0.5173
155	110.0012	109.2358	0.5858	358	110.0000	109.1383	0.7425
156	110.0049	109.1123	0.7968	359	110.0000	109.1502	0.7222
157	110.0076	109.2403	0.5887	360	110.0000	109.2680	0.5358
158	110.0095	109.1872	0.6761	361	110.0000	109.1173	0.7792
159	110.0105	109.1437	0.7513	362	110.0000	109.1813	0.6703
160	110.0109	109.2633	0.5589	363	110.0000	109.2154	0.6156
161	110.0108	109.1410	0.7567	364	110.0000	109.0878	0.8321
162	110.0104	109.2003	0.6562	365	110.0000	109.2761	0.5240
163	110.0097	109.2312	0.6061	366	110.0000	109.1611	0.7038
164	110.0088	109.1215	0.7874	367	110.0000	109.1355	0.7474
165	110.0079	109.2512	0.5726	368	110.0000	109.2731	0.5284
166	110.0069	109.1680	0.7038	369	110.0000	109.0875	0.8326
167	110.0057	109.1776	0.6857	370	110.0000	109.2026	0.6359
168	110.0045	109.2374	0.5885	371	110.0000	109.2270	0.5975
169	110.0035	109.0950	0.8253	372	110.0000	109.0911	0.8261
170	110.0027	109.2551	0.5589	373	110.0000	109.2761	0.5240
171	110.0019	109.1800	0.6755	374	110.0000	109.1592	0.7070
172	110.0011	109.1467	0.7301	375	110.0000	109.1371	0.7446
173	110.0006	109.2733	0.5289	376	110.0000	109.2711	0.5313
174	110.0001	109.0903	0.8278	377	110.0000	109.0855	0.8364
175	109.9998	109.2024	0.6359	378	110.0000	109.2066	0.6295
176	109.9995	109.2237	0.6019	379	110.0000	109.2257	0.5996



177	109.9993	109.0933	0.8208	380	110.0000	109.0927	0.8232
178	109.9992	109.2757	0.5234	381	110.0000	109.2806	0.5175
179	109.9991	109.1542	0.7138	382	110.0000	109.1538	0.7160
180	109.9991	109.1393	0.7392	383	110.0000	109.1370	0.7448
181	109.9991	109.2665	0.5367	384	110.0000	109.2712	0.5311
182	109.9991	109.0797	0.8453	385	110.0000	109.0791	0.8481
183	109.9992	109.2141	0.6163	386	110.0000	109.2111	0.6224
184	109.9993	109.2229	0.6027	387	110.0000	109.2286	0.5950
185	109.9993	109.0889	0.8290	388	110.0000	109.0865	0.8345
186	109.9994	109.2454	0.5685	389	110.0000	109.2442	0.5712
187	109.9995	109.1869	0.6603	390	110.0000	109.1923	0.6523
188	109.9996	109.1152	0.7821	391	110.0000	109.1094	0.7931
189	109.9997	109.2627	0.5432	392	110.0000	109.2599	0.5477
190	109.9997	109.1396	0.7398	393	110.0000	109.1518	0.7195
191	109.9998	109.1685	0.6911	394	110.0000	109.1612	0.7036
192	109.9999	109.2498	0.5626	395	110.0000	109.2531	0.5578
193	109.9999	109.1151	0.7829	396	110.0000	109.1084	0.7950
194	110.0000	109.2034	0.6345	397	110.0000	109.2089	0.6258
195	110.0000	109.1964	0.6458	398	110.0000	109.1987	0.6420
196	110.0000	109.1279	0.7607	399	110.0000	109.1275	0.7612
197	110.0001	109.2721	0.5299	400	110.0000	109.2781	0.5211
198	110.0001	109.1147	0.7839	401	110.0000	109.1108	0.7907
199	110.0001	109.1814	0.6703	402	110.0000	109.1775	0.6765
200	110.0001	109.2176	0.6123	403	110.0000	109.2253	0.6001
201	110.0001	109.0845	0.8384	404	110.0000	109.0778	0.8505
202	110.0001	109.2765	0.5235	405	110.0000	109.2719	0.5302
203	110.0001	109.1653	0.6968	406	110.0000	109.1777	0.6761
				407	110.0000	109.1038	0.8032

Lampiran 5. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,85

No	PID real	PID pemodelan	Error	No	PID real	PID pemodelan	Error
1	0.0000	0.0000	0.0000	195	110.0000	109.1665	0.6949
2	0.0000	0.0000	0.0000	196	110.0000	109.2470	0.5671
3	0.0000	0.0000	0.0000	197	110.0000	109.2636	0.5423
4	0.0000	0.0000	0.0000	198	110.0000	109.1602	0.7053
5	0.0004	0.0000	0.0000	199	110.0000	109.3297	0.4494
6	0.0100	0.0000	0.0001	200	110.0000	109.1915	0.6536
7	0.2476	0.0022	0.0603	201	110.0000	109.2144	0.6171
8	1.1033	0.0440	1.1220	202	110.0000	109.3147	0.4697



9	3.2336	0.3990	8.0353	203	110.0000	109.1716	0.6862
10	7.0857	2.2083	23.7897	204	110.0000	109.2465	0.5678
11	11.1733	7.4134	14.1368	205	110.0000	109.2586	0.5497
12	12.4623	15.3144	8.1345	206	110.0000	109.1649	0.6975
13	10.5687	19.4743	79.3091	207	110.0000	109.3296	0.4495
14	5.2195	15.7104	110.0587	208	110.0000	109.1852	0.6640
15	-0.5650	2.5154	9.4887	209	110.0000	109.2203	0.6080
16	-4.7625	-10.7656	36.0366	210	110.0000	109.3144	0.4701
17	-7.3113	-18.7382	130.5739	211	110.0000	109.1851	0.6640
18	-6.5580	-13.4356	47.3020	212	110.0000	109.2320	0.5898
19	-3.7060	-2.9569	0.5611	213	110.0000	109.2905	0.5035
20	0.6136	6.9248	39.8317	214	110.0000	109.1660	0.6955
21	4.9715	9.3648	19.3011	215	110.0000	109.2821	0.5153
22	7.1682	6.5753	0.3515	216	110.0000	109.2310	0.5914
23	8.2730	4.3986	15.0115	217	110.0000	109.1898	0.6565
24	8.5553	6.2277	5.4180	218	110.0000	109.3026	0.4864
25	8.7226	10.0151	1.6704	219	110.0000	109.1872	0.6606
26	9.1888	12.2011	9.0736	220	110.0000	109.2489	0.5641
27	10.0531	10.1966	0.0206	221	110.0000	109.2658	0.5390
28	10.5542	8.2395	5.3582	222	110.0000	109.1738	0.6826
29	10.3820	8.9166	2.1472	223	110.0000	109.3054	0.4825
30	9.2468	11.0938	3.4115	224	110.0000	109.1978	0.6435
31	7.4473	10.6761	10.4251	225	110.0000	109.2355	0.5845
32	5.4816	6.5243	1.0873	226	110.0000	109.2897	0.5045
33	3.8634	1.6177	5.0435	227	110.0000	109.1699	0.6891
34	2.9701	-0.0800	9.3027	228	110.0000	109.2769	0.5229
35	3.3720	2.9504	0.1777	229	110.0000	109.2318	0.5901
36	4.7717	6.0776	1.7055	230	110.0000	109.1788	0.6744
37	6.9646	7.3733	0.1670	231	110.0000	109.2818	0.5158
38	9.4256	7.9869	2.0700	232	110.0000	109.2260	0.5991
39	11.8482	10.6181	1.5131	233	110.0000	109.2115	0.6217
40	13.6348	14.7186	1.1746	234	110.0000	109.2913	0.5022
41	14.4102	16.2984	3.5654	235	110.0000	109.1691	0.6905
42	14.4324	14.8886	0.2082	236	110.0000	109.2815	0.5162
43	13.8646	12.8051	1.1226	237	110.0000	109.2281	0.5958
44	12.6787	12.3612	0.1008	238	110.0000	109.1951	0.6479
45	11.6765	12.5560	0.7736	239	110.0000	109.3015	0.4879
46	10.9071	11.0157	0.0118	240	110.0000	109.1816	0.6699
47	10.7439	9.4872	1.5792	241	110.0000	109.2560	0.5536
48	11.2185	10.3095	0.8263	242	110.0000	109.2365	0.5829

49	12.2999	12.6297	0.1087	243	110.0000	109.1933	0.6508
50	13.7896	13.9709	0.0329	244	110.0000	109.3253	0.4552
51	15.4961	14.7351	0.5791	245	110.0000	109.1517	0.7196
52	16.9927	16.5546	0.1919	246	110.0000	109.2561	0.5533
53	18.1664	18.7721	0.3669	247	110.0000	109.2709	0.5316
54	18.7418	19.1280	0.1491	248	110.0000	109.1577	0.7095
55	18.8623	18.3545	0.2578	249	110.0000	109.3330	0.4450
56	18.7420	18.4210	0.1030	250	110.0000	109.1933	0.6508
57	18.7117	18.8805	0.0285	251	110.0000	109.2092	0.6253
58	19.0524	18.7102	0.1171	252	110.0000	109.3185	0.4645
59	19.8113	19.0970	0.5103	253	110.0000	109.1698	0.6893
60	21.0845	21.0572	0.0007	254	110.0000	109.2446	0.5706
61	22.2183	22.3257	0.0115	255	110.0000	109.2623	0.5442
62	23.1630	22.8340	0.1083	256	110.0000	109.1596	0.7063
63	23.8133	23.5859	0.0517	257	110.0000	109.3300	0.4489
64	24.3202	24.3912	0.0050	258	110.0000	109.1916	0.6535
65	24.8659	24.4652	0.1605	259	110.0000	109.2139	0.6179
66	25.8292	25.1920	0.4060	260	110.0000	109.3151	0.4691
67	27.3557	27.0792	0.0764	261	110.0000	109.1714	0.6865
68	29.2695	29.0197	0.0624	262	110.0000	109.2463	0.5681
69	31.3948	31.0829	0.0972	263	110.0000	109.2590	0.5491
70	32.7071	32.8099	0.0106	264	110.0000	109.1643	0.6984
71	33.1132	33.1851	0.0052	265	110.0000	109.3296	0.4494
72	32.8547	32.5642	0.0844	266	110.0000	109.1858	0.6629
73	32.4945	32.1701	0.1053	267	110.0000	109.2196	0.6091
74	32.8095	32.2857	0.2744	268	110.0000	109.3159	0.4680
75	34.3162	33.4888	0.6846	269	110.0000	109.1967	0.6453
76	36.9822	36.3884	0.3526	270	110.0000	109.2196	0.6091
77	41.2217	41.0088	0.0453	271	110.0000	109.3010	0.4887
78	44.1479	44.0284	0.0143	272	110.0000	109.1824	0.6685
79	45.1138	45.2177	0.0108	273	110.0000	109.2509	0.5612
80	44.9661	44.7544	0.0448	274	110.0000	109.2427	0.5736
81	44.5826	43.9943	0.3461	275	110.0000	109.1856	0.6632
82	45.3751	44.7786	0.3558	276	110.0000	109.3252	0.4554
83	47.5938	46.7643	0.6880	277	110.0000	109.1617	0.7028
84	50.2298	49.6829	0.2991	278	110.0000	109.2470	0.5670
85	53.7556	53.6164	0.0194	279	110.0000	109.2684	0.5352
86	55.6075	55.3015	0.0936	280	110.0000	109.1553	0.7135
87	56.5250	56.2807	0.0597	281	110.0000	109.3296	0.4495
88	56.9728	56.5252	0.2003	282	110.0000	109.1981	0.6430



89	58.0962	57.2911	0.6482	283	110.0000	109.2086	0.6263
90	59.9792	59.3620	0.3808	284	110.0000	109.3171	0.4664
91	62.9599	62.3770	0.3398	285	110.0000	109.1666	0.6945
92	65.7920	65.3895	0.1620	286	110.0000	109.2500	0.5625
93	67.4175	67.1846	0.0542	287	110.0000	109.2605	0.5468
94	68.4212	67.8780	0.2951	288	110.0000	109.1658	0.6960
95	69.3328	68.7064	0.3924	289	110.0000	109.3293	0.4498
96	70.9745	70.3187	0.4301	290	110.0000	109.1848	0.6645
97	73.1071	72.2668	0.7060	291	110.0000	109.2208	0.6071
98	75.2707	74.7418	0.2797	292	110.0000	109.3135	0.4713
99	77.4426	76.9945	0.2008	293	110.0000	109.1813	0.6703
100	78.9816	78.3750	0.3679	294	110.0000	109.2367	0.5826
101	80.1394	79.6189	0.2710	295	110.0000	109.2846	0.5118
102	81.2755	80.6556	0.3842	296	110.0000	109.1636	0.6995
103	82.6022	81.7733	0.6871	297	110.0000	109.2936	0.4991
104	84.3063	83.6143	0.4789	298	110.0000	109.2225	0.6045
105	86.4021	85.7187	0.4671	299	110.0000	109.2269	0.5977
106	88.5385	87.8493	0.4749	300	110.0000	109.2980	0.4928
107	90.3239	89.7880	0.2872	301	110.0000	109.1390	0.7413
108	91.6996	90.9841	0.5119	302	110.0000	109.3046	0.4835
109	92.9951	92.2617	0.5379	303	110.0000	109.2411	0.5759
110	94.3288	93.6239	0.4970	304	110.0000	109.1702	0.6886
111	95.8368	95.0097	0.6842	305	110.0000	109.3218	0.4599
112	97.5398	96.8491	0.4771	306	110.0000	109.1873	0.6605
113	99.2015	98.4966	0.4969	307	110.0000	109.2271	0.5974
114	100.4072	99.6458	0.5798	308	110.0000	109.3060	0.4816
115	101.4434	100.7710	0.4522	309	110.0000	109.1777	0.6762
116	102.5389	101.7552	0.6141	310	110.0000	109.2482	0.5652
117	103.6598	102.9050	0.5697	311	110.0000	109.2505	0.5618
118	104.6446	103.9283	0.5132	312	110.0000	109.1747	0.6812
119	105.5683	104.7496	0.6703	313	110.0000	109.3283	0.4512
120	106.3854	105.6942	0.4778	314	110.0000	109.1732	0.6835
121	107.0937	106.3218	0.5958	315	110.0000	109.2326	0.5889
122	107.7588	106.9970	0.5805	316	110.0000	109.2985	0.4921
123	108.2781	107.5716	0.4991	317	110.0000	109.1547	0.7145
124	108.6688	107.8219	0.7173	318	110.0000	109.2852	0.5110
125	108.9750	108.2884	0.4715	319	110.0000	109.2408	0.5764
126	109.2381	108.4643	0.5988	320	110.0000	109.1736	0.6830
127	109.4972	108.7023	0.6319	321	110.0000	109.3021	0.4871
128	109.6967	109.0145	0.4654	322	110.0000	109.2078	0.6275



129	109.8444	108.9886	0.7324	323	110.0000	109.2295	0.5936
130	109.9587	109.2336	0.5258	324	110.0000	109.2915	0.5019
131	110.0521	109.3168	0.5407	325	110.0000	109.1625	0.7013
132	110.1093	109.2681	0.7076	326	110.0000	109.2864	0.5092
133	110.1432	109.4487	0.4823	327	110.0000	109.2308	0.5917
134	110.1618	109.3841	0.6047	328	110.0000	109.1915	0.6537
135	110.1720	109.3843	0.6205	329	110.0000	109.3060	0.4816
136	110.1754	109.4805	0.4829	330	110.0000	109.1793	0.6736
137	110.1752	109.3180	0.7348	331	110.0000	109.2530	0.5580
138	110.1718	109.4603	0.5063	332	110.0000	109.2422	0.5742
139	110.1642	109.4147	0.5617	333	110.0000	109.1827	0.6680
140	110.1534	109.3146	0.7035	334	110.0000	109.3298	0.4492
141	110.1396	109.4380	0.4922	335	110.0000	109.1609	0.7040
142	110.1227	109.3487	0.5991	336	110.0000	109.2421	0.5744
143	110.1017	109.3178	0.6146	337	110.0000	109.2739	0.5273
144	110.0848	109.3897	0.4832	338	110.0000	109.1476	0.7267
145	110.0716	109.2142	0.7351	339	110.0000	109.3282	0.4513
146	110.0610	109.3512	0.5038	340	110.0000	109.2091	0.6256
147	110.0514	109.3005	0.5638	341	110.0000	109.2002	0.6396
148	110.0435	109.2059	0.7015	342	110.0000	109.3149	0.4694
149	110.0361	109.3401	0.4843	343	110.0000	109.1318	0.7538
150	110.0286	109.2468	0.6112	344	110.0000	109.2848	0.5115
151	110.0206	109.2383	0.6119	345	110.0000	109.2668	0.5376
152	110.0137	109.3101	0.4950	346	110.0000	109.1481	0.7258
153	110.0089	109.1531	0.7324	347	110.0000	109.2959	0.4957
154	110.0055	109.3047	0.4911	348	110.0000	109.2416	0.5751
155	110.0030	109.2425	0.5784	349	110.0000	109.1755	0.6798
156	110.0014	109.1757	0.6818	350	110.0000	109.3141	0.4704
157	110.0003	109.3181	0.4653	351	110.0000	109.1893	0.6572
158	109.9994	109.1861	0.6614	352	110.0000	109.2338	0.5870
159	109.9985	109.2307	0.5896	353	110.0000	109.2965	0.4950
160	109.9978	109.2957	0.4929	354	110.0000	109.1729	0.6842
161	109.9971	109.1659	0.6910	355	110.0000	109.2643	0.5412
162	109.9967	109.2644	0.5362	356	110.0000	109.2405	0.5768
163	109.9965	109.2383	0.5749	357	110.0000	109.1841	0.6657
164	109.9967	109.1783	0.6698	358	110.0000	109.3092	0.4772
165	109.9970	109.3052	0.4785	359	110.0000	109.1828	0.6678
166	109.9974	109.1852	0.6596	360	110.0000	109.2457	0.5690
167	109.9978	109.2397	0.5748	361	110.0000	109.2728	0.5288
168	109.9981	109.2790	0.5170	362	110.0000	109.1676	0.6928

169	109.9983	109.1661	0.6926	363	110.0000	109.3045	0.4837
170	109.9984	109.2895	0.5026	364	110.0000	109.2065	0.6296
171	109.9986	109.2187	0.6083	365	110.0000	109.2284	0.5953
172	109.9988	109.2312	0.5891	366	110.0000	109.2941	0.4983
173	109.9990	109.2891	0.5040	367	110.0000	109.1616	0.7030
174	109.9992	109.1402	0.7379	368	110.0000	109.2841	0.5126
175	109.9994	109.3129	0.4714	369	110.0000	109.2342	0.5865
176	109.9996	109.2304	0.5917	370	110.0000	109.1846	0.6650
177	109.9997	109.1959	0.6461	371	110.0000	109.3044	0.4838
178	109.9998	109.3266	0.4533	372	110.0000	109.1914	0.6538
179	109.9998	109.1452	0.7305	373	110.0000	109.2427	0.5735
180	109.9999	109.2599	0.5475	374	110.0000	109.2812	0.5167
181	109.9999	109.2740	0.5269	375	110.0000	109.1710	0.6872
182	109.9999	109.1548	0.7142	376	110.0000	109.2855	0.5105
183	110.0000	109.3367	0.4399	377	110.0000	109.2220	0.6053
184	110.0000	109.1941	0.6496	378	110.0000	109.2105	0.6234
185	110.0000	109.2044	0.6330	379	110.0000	109.2961	0.4955
186	110.0001	109.3226	0.4590	380	110.0000	109.1645	0.6980
187	110.0001	109.1701	0.6888	381	110.0000	109.2805	0.5176
188	110.0001	109.2401	0.5775	382	110.0000	109.2342	0.5865
189	110.0001	109.2666	0.5380	383	110.0000	109.1814	0.6700
190	110.0000	109.1512	0.7204	384	110.0000	109.2976	0.4934
191	110.0000	109.3312	0.4473	385	110.0000	109.2046	0.6327
192	110.0000	109.2011	0.6383	386	110.0000	109.2376	0.5813
193	110.0000	109.2042	0.6333	387	110.0000	109.2820	0.5155
194	110.0000	109.3203	0.4621	388	110.0000	109.1675	0.6931
				389	110.0000	109.2882	0.5067

Lampiran 6. Data untuk perhitungan nilai RMSE pada duty cycle 0,85

No	PID real	PID pemodelan	Error	No	PID real	PID pemodelan	Error
1	0.0000	0.0000	0.0000	181	110.0014	109.2417	0.5772
2	0.0000	0.0000	0.0000	182	110.0064	109.3661	0.4100
3	0.0000	0.0000	0.0000	183	110.0086	109.2478	0.5787
4	0.0000	0.0000	0.0000	184	110.0066	109.3121	0.4824
5	0.0004	0.0000	0.0000	185	110.0016	109.3200	0.4645
6	0.0100	0.0000	0.0001	186	109.9962	109.2221	0.5993
7	0.2425	0.0018	0.0579	187	109.9936	109.3584	0.4034
8	1.0951	0.0365	1.1204	188	109.9945	109.2364	0.5748
9	3.2228	0.3351	8.3390	189	109.9985	109.2925	0.4985



10	7.0736	1.8839	26.9330	190	110.0028	109.3463	0.4310
11	11.1232	6.4488	21.8503	191	110.0057	109.2273	0.6059
12	12.3199	14.6401	5.3833	192	110.0060	109.3412	0.4420
13	9.9813	19.3237	87.2799	193	110.0031	109.2841	0.5170
14	4.2477	16.4996	150.1085	194	109.9992	109.2432	0.5716
15	-1.8792	2.7218	21.1690	195	109.9959	109.3517	0.4150
16	-5.8182	-11.9695	37.8390	196	109.9947	109.2337	0.5792
17	-7.4664	-21.2005	188.6261	197	109.9964	109.3038	0.4798
18	-6.0903	-17.5881	132.1994	198	110.0001	109.3108	0.4752
19	-2.6534	-4.9810	5.4179	199	110.0036	109.2360	0.5893
20	1.4637	8.5235	49.8416	200	110.0049	109.3731	0.3991
21	5.0735	15.0645	99.8191	201	110.0036	109.2361	0.5890
22	7.0392	11.1792	17.1399	202	110.0006	109.3025	0.4874
23	7.7185	4.1852	12.4841	203	109.9968	109.2947	0.4929
24	8.0342	0.7085	53.6653	204	109.9957	109.2113	0.6152
25	8.5569	5.7770	7.7282	205	109.9969	109.3996	0.3569
26	9.3051	12.4624	9.9689	206	109.9994	109.2150	0.6154
27	10.1471	15.7420	31.3037	207	110.0021	109.2784	0.5238
28	10.1462	11.7835	2.6806	208	110.0038	109.3763	0.3937
29	9.1612	6.7047	6.0344	209	110.0036	109.2028	0.6413
30	6.6140	4.3102	5.3076	210	110.0019	109.3295	0.4521
31	4.3000	5.5916	1.6682	211	109.9991	109.3113	0.4731
32	2.5558	5.2650	7.3394	212	109.9971	109.2087	0.6215
33	1.8536	2.1041	0.0628	213	109.9965	109.3638	0.4004
34	2.2808	-0.8828	10.0085	214	109.9976	109.2580	0.5470
35	4.0024	0.5068	12.2191	215	110.0001	109.2746	0.5264
36	6.5659	6.8075	0.0584	216	110.0022	109.3610	0.4111
37	8.8956	11.5549	7.0714	217	110.0031	109.2119	0.6259
38	10.9498	12.5879	2.6832	218	110.0024	109.3381	0.4414
39	12.3118	11.2981	1.0275	219	110.0005	109.2945	0.4984
40	12.9057	11.3376	2.4588	220	109.9987	109.2222	0.6030
41	12.6555	13.5106	0.7313	221	109.9975	109.3492	0.4202
42	11.8869	13.9771	4.3689	222	109.9974	109.2650	0.5365
43	10.7995	11.4525	0.4264	223	109.9989	109.2836	0.5116
44	9.7059	8.2404	2.1477	224	110.0010	109.3329	0.4464
45	8.7937	7.4548	1.7928	225	110.0022	109.2022	0.6401
46	8.5064	8.9697	0.2147	226	110.0022	109.3821	0.3846
47	8.9178	9.5628	0.4160	227	110.0012	109.2626	0.5455
48	10.1684	9.1082	1.1240	228	109.9996	109.2607	0.5460
49	11.7262	10.3070	2.0143	229	109.9982	109.3594	0.4080



50	13.4675	13.4716	0.0000	230	109.9980	109.1776	0.6730
51	14.9966	16.0730	1.1588	231	109.9988	109.3571	0.4117
52	16.0549	16.4386	0.1472	232	110.0000	109.3048	0.4833
53	16.3896	15.8324	0.3104	233	110.0012	109.2090	0.6276
54	15.9974	16.0615	0.0041	234	110.0018	109.3777	0.3896
55	15.3501	15.9364	0.3437	235	110.0016	109.2602	0.5496
56	14.8055	14.2805	0.2756	236	110.0005	109.2684	0.5360
57	14.9185	13.9234	0.9902	237	109.9992	109.3655	0.4017
58	15.6112	15.3988	0.0451	238	109.9984	109.2079	0.6249
59	16.7399	16.9638	0.0502	239	109.9984	109.3229	0.4563
60	18.0613	17.7503	0.0967	240	109.9993	109.3021	0.4861
61	19.2618	18.8001	0.2131	241	110.0004	109.2230	0.6042
62	20.1548	20.3408	0.0346	242	110.0012	109.3700	0.3985
63	20.6692	20.9651	0.0876	243	110.0014	109.2478	0.5680
64	20.9681	20.5942	0.1398	244	110.0009	109.2880	0.5082
65	21.3028	20.7950	0.2578	245	110.0000	109.3524	0.4195
66	21.9259	21.8544	0.0051	246	109.9992	109.2218	0.6043
67	22.8613	22.6796	0.0330	247	109.9987	109.3215	0.4587
68	24.0490	23.6393	0.1678	248	109.9989	109.2893	0.5036
69	24.9968	25.0462	0.0024	249	109.9997	109.2385	0.5794
70	25.5196	25.6081	0.0078	250	110.0006	109.3656	0.4032
71	25.7539	25.4000	0.1252	251	110.0011	109.2314	0.5924
72	26.0781	25.7114	0.1345	252	110.0011	109.3080	0.4803
73	27.0963	26.7403	0.1267	253	110.0003	109.2954	0.4969
74	29.2593	28.6420	0.3811	254	109.9995	109.2316	0.5897
75	31.4505	31.2233	0.0516	255	109.9990	109.3906	0.3701
76	33.5975	33.7164	0.0141	256	109.9990	109.2054	0.6298
77	34.3808	34.2881	0.0086	257	109.9995	109.2974	0.4930
78	34.0337	34.0054	0.0008	258	110.0002	109.3312	0.4476
79	33.5799	33.2426	0.1137	259	110.0008	109.1971	0.6459
80	34.0905	33.2853	0.6483	260	110.0008	109.3899	0.3733
81	36.1161	35.5122	0.3646	261	110.0005	109.2581	0.5513
82	40.2628	39.8901	0.1389	262	110.0000	109.2546	0.5556
83	43.1535	43.1186	0.0012	263	109.9995	109.3788	0.3852
84	44.2445	44.4436	0.0396	264	109.9992	109.2120	0.6197
85	44.2719	44.0544	0.0473	265	109.9994	109.3049	0.4823
86	43.9364	43.4372	0.2491	266	109.9999	109.3169	0.4665
87	44.5327	43.9594	0.3287	267	110.0004	109.2147	0.6173
88	46.5880	45.7697	0.6696	268	110.0007	109.3914	0.3712
89	49.0549	48.6015	0.2056	269	110.0006	109.2337	0.5882



90	52.0136	51.9470	0.0044	270	110.0002	109.2752	0.5257
91	53.6072	53.3336	0.0749	271	109.9998	109.3697	0.3971
92	54.2141	53.9724	0.0584	272	109.9995	109.2193	0.6087
93	54.6377	54.1408	0.2469	273	109.9994	109.3056	0.4814
94	56.0546	55.2754	0.6072	274	109.9997	109.3088	0.4772
95	58.1984	57.7005	0.2478	275	110.0001	109.2242	0.6020
96	61.0618	60.6381	0.1795	276	110.0004	109.3888	0.3742
97	63.1689	62.8850	0.0806	277	110.0005	109.2228	0.6049
98	64.2353	63.9444	0.0846	278	110.0004	109.2880	0.5075
99	65.0789	64.4140	0.4421	279	110.0001	109.3537	0.4178
100	66.3457	65.7320	0.3767	280	109.9997	109.2021	0.6363
101	68.3890	67.7938	0.3543	281	109.9996	109.3474	0.4254
102	71.1076	70.5539	0.3066	282	109.9996	109.2885	0.5057
103	72.9406	72.6510	0.0838	283	109.9998	109.2334	0.5874
104	74.1942	73.6690	0.2758	284	110.0001	109.3696	0.3976
105	75.3504	74.7322	0.3823	285	110.0004	109.2332	0.5886
106	76.6217	76.0656	0.3093	286	110.0004	109.2996	0.4910
107	78.2507	77.5128	0.5445	287	110.0002	109.3305	0.4485
108	80.1090	79.5257	0.3402	288	109.9999	109.2158	0.6149
109	82.2288	81.7431	0.2359	289	109.9997	109.3624	0.4062
110	83.7554	83.1137	0.4118	290	109.9996	109.2577	0.5504
111	84.9957	84.4797	0.2663	291	109.9998	109.2822	0.5148
112	86.2273	85.5321	0.4832	292	110.0000	109.3505	0.4218
113	87.7911	87.0906	0.4907	293	110.0002	109.2102	0.6242
114	89.3122	88.7548	0.3106	294	110.0003	109.3440	0.4307
115	90.7945	90.1085	0.4705	295	110.0003	109.2846	0.5121
116	92.2025	91.5949	0.3692	296	110.0001	109.2420	0.5746
117	93.7552	93.1209	0.4023	297	109.9999	109.3647	0.4034
118	95.1025	94.3721	0.5335	298	109.9997	109.2276	0.5962
119	96.3173	95.7356	0.3383	299	109.9997	109.3092	0.4768
120	97.4732	96.7231	0.5626	300	109.9999	109.2955	0.4962
121	98.5940	97.9334	0.4364	301	110.0001	109.2376	0.5815
122	99.8544	99.2109	0.4141	302	110.0002	109.3880	0.3749
123	100.8953	100.1318	0.5828	303	110.0002	109.2048	0.6327
124	101.7664	101.1847	0.3384	304	110.0001	109.3048	0.4834
125	102.5554	101.8182	0.5434	305	109.9999	109.3266	0.4533
126	103.3300	102.6149	0.5113	306	109.9998	109.2036	0.6339
127	104.0008	103.3946	0.3674	307	109.9998	109.3907	0.3710
128	104.6255	103.8562	0.5918	308	109.9999	109.2463	0.5678
129	105.2353	104.5494	0.4705	309	110.0000	109.2624	0.5441

130	105.9185	105.2440	0.4550	310	110.0001	109.3756	0.3901
131	106.4836	105.7138	0.5927	311	110.0002	109.2165	0.6143
132	106.9248	106.3273	0.3570	312	110.0002	109.3057	0.4823
133	107.2970	106.5355	0.5798	313	110.0000	109.3136	0.4711
134	107.6333	106.9189	0.5104	314	109.9999	109.2182	0.6111
135	107.9232	107.2951	0.3945	315	109.9998	109.3895	0.3725
136	108.1874	107.4009	0.6187	316	109.9999	109.2283	0.5953
137	108.4400	107.7628	0.4586	317	109.9999	109.2801	0.5182
138	108.7012	108.0090	0.4792	318	110.0001	109.3633	0.4055
139	108.9098	108.1354	0.5998	319	110.0001	109.2089	0.6260
140	109.0859	108.4602	0.3915	320	110.0001	109.3270	0.4531
141	109.2286	108.4799	0.5605	321	110.0001	109.3019	0.4874
142	109.3484	108.6370	0.5060	322	110.0000	109.2233	0.6033
143	109.4362	108.7900	0.4176	323	109.9999	109.3672	0.4003
144	109.5142	108.7319	0.6119	324	109.9999	109.2473	0.5663
145	109.5928	108.9218	0.4502	325	109.9999	109.2872	0.5080
146	109.6763	108.9650	0.5060	326	110.0000	109.3503	0.4221
147	109.7452	108.9815	0.5832	327	110.0001	109.2205	0.6078
148	109.8036	109.1655	0.4072	328	110.0001	109.3284	0.4511
149	109.8495	109.0942	0.5704	329	110.0001	109.2878	0.5073
150	109.8798	109.1816	0.4875	330	110.0000	109.2388	0.5794
151	109.8952	109.2283	0.4448	331	110.0000	109.3608	0.4085
152	109.9057	109.1268	0.6067	332	109.9999	109.2376	0.5811
153	109.9185	109.2673	0.4241	333	109.9999	109.3040	0.4843
154	109.9369	109.2004	0.5423	334	109.9999	109.3194	0.4631
155	109.9632	109.2545	0.5022	335	110.0000	109.2247	0.6011
156	109.9872	109.3117	0.4563	336	110.0001	109.3656	0.4025
157	109.9993	109.2014	0.6367	337	110.0001	109.2442	0.5714
158	110.0015	109.3921	0.3714	338	110.0001	109.2926	0.5005
159	109.9972	109.2490	0.5598	339	110.0000	109.3508	0.4214
160	109.9903	109.2503	0.5476	340	110.0000	109.2308	0.5915
161	109.9864	109.3613	0.3907	341	109.9999	109.3137	0.4709
162	109.9876	109.2002	0.6200	342	109.9999	109.2898	0.5043
163	109.9946	109.3016	0.4802	343	110.0000	109.2574	0.5515
164	110.0061	109.3199	0.4709	344	110.0001	109.3753	0.3903
165	110.0149	109.2352	0.6079	345	110.0001	109.1935	0.6506
166	110.0161	109.4076	0.3703	346	110.0001	109.3314	0.4471
167	110.0114	109.2392	0.5963	347	110.0000	109.3143	0.4702
168	110.0033	109.2845	0.5167	348	110.0000	109.2082	0.6269
169	109.9961	109.3580	0.4071	349	109.9999	109.3652	0.4029



170	109.9927	109.1987	0.6306	350	109.9999	109.2679	0.5359
171	109.9945	109.3237	0.4500	351	110.0000	109.2702	0.5325
172	110.0010	109.3013	0.4897	352	110.0000	109.3521	0.4198
173	110.0079	109.2310	0.6037	353	110.0000	109.1900	0.6562
174	110.0121	109.3782	0.4018	354	110.0001	109.3628	0.4061
175	110.0116	109.2635	0.5597	355	110.0000	109.2893	0.5051
176	110.0062	109.2928	0.5089	356	110.0000	109.2530	0.5581
177	109.9994	109.3477	0.4248	357	110.0000	109.3901	0.3720
178	109.9943	109.2097	0.6155	358	110.0000	109.1851	0.6640
179	109.9929	109.3297	0.4399	359	110.0000	109.2243	0.6016
180	109.9961	109.2792	0.5140				

Lampiran 7. Data untuk perhitungan nilai *RMSE* pada *duty cycle* 0,87

