

**APLIKASI SLIDING MODE CONTROL (SMC) UNTUK MEREDUKSI OSILASI
TEGANGAN KELUARAN BOOST CONVERTER PADA PANEL SURYA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**ALDI LUTFIL HIKAM
NIM. 165060301111034**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2020**



LEMBAR PENGESAHAN

**APLIKASI *SLIDING MODE CONTROL* (SMC) UNTUK MEREDUKSI
OSILASI TEGANGAN KELUARAN *BOOST CONVERTER* PADA PANEL
SURYA**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditunjukkan untuk Memenuhi Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



ALDI LUTFIL HIKAM

NIM. 165060301111034

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing

Pada tanggal 21 Mei 2021

Dosen Pembimbing I



Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

NIP. 19621111 198903 1 003

Dosen Pembimbing II



Dr. Tri Nurwati, S.T., M.T.

NIP. 19790615 200812 2 003

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU., ASEAN Eng.

NIP. 19730520 200801 1 013

JUDUL SKRIPSI:

APLIKASI *SLIDING MODE CONTROL* (SMC) UNTUK MEREDUKSI OSILASI
TEGANGAN KELUARAN *BOOST CONVERTER* PADA PANEL SURYA

Nama Mahasiswa : Aldi Lutfil Hikam
NIM : 165060301111034
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.



Anggota : Dr. Tri Nurwati, S.T., M.T.



TIM DOSEN PENGUJI:

Dosen Penguji I : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM, Disetujui tanggal 21 Mei 2021

Dosen Penguji II : Lunde Ardhenta, S.T., M.Sc. Disetujui tanggal 21 Mei 2021

Tanggal Ujian : 22 April 2021

SK Penguji : No. 650 Tahun 2021

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 perundangundangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 21 Mei 2021

Mahasiswa



ALDI LUTFIL HIKAM

NIM. 165060301111034

RINGKASAN

ALDI LUTFIL HIKAM, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, **Aplikasi Sliding Mode Control (SMC) untuk Mereduksi Osilasi Tegangan Keluaran Boost Converter pada Panel Surya**. Dosen Pembimbing : Ir. Wijono, M.T., Ph.D. dan Dr. Tri Nurwati, S.T., M.T.

Pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan yang saat ini sedang banyak diaplikasikan adalah sel surya atau *sel photovoltaic* yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Tegangan yang dihasilkan sel surya tergantung kondisi intensitas cahaya matahari yang diterima oleh sel surya di sepanjang waktu. Maka dibutuhkan metode untuk melacak titik daya maksimum sel surya yang berubah menggunakan *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*. Untuk mengendalikan tegangan sel surya maka digunakan konverter, jenis konverter yang digunakan adalah Boost Converter yang mengubah tegangan keluaran sel surya menjadi lebih besar. Namun tegangan keluaran yang dihasilkan oleh Boost Converter memiliki kekurangan seperti adanya osilasi. Oleh karena itu untuk mereduksi osilasi dibutuhkan pengendali pada Boost Converter.

Pada penelitian ini dilakukan penerapan metode SMC pada sistem *Boost Converter* untuk memperkecil osilasi tegangan keluaran *Boost Converter*. Dimana masukan dari *Boost Converter* adalah keluaran dari sel surya yang bervariasi tergantung pada perubahan iradiasi cahaya matahari. Penelitian dilakukan dengan simulasi pada MATLAB Simulink yang disimulasikan pada sistem *open loop* dan *close loop*. Nantinya *settling time* dan selisih tegangan keluaran saat sebelum terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan berupa tegangan masukan yang bervariasi dan beban yang bervariasi dianalisis.

Berdasarkan analisis penelitian tegangan keluaran pengendali SMC dapat mempercepat *settling time* tegangan keluaran dari nilai *settling time* ketika loop terbuka. Pada saat terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu yang menyebabkan terjadinya lonjakan tegangan, pengendali SMC dapat memperbaiki tegangan *recovery time* lebih cepat dari sistem open loop. Ketika beban R bervariasi tegangan yang dihasilkan sel surya dan tegangan keluaran boost converter semakin besar seiring dengan bertambahnya beban R. Ketika beban R berubah pengendali SMC mempunyai *settling time* yang lebih cepat dari *settling time* ketika loop terbuka.

Kata kunci— *Sel Photovoltaic, MPPT, Boost Converter, Sliding Mode Control (SMC), settling time, recovery time.*

SUMMARY

ALDI LUTFIL HIKAM, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, Application of Sliding Mode Control (SMC) to Reduce the Output Voltage Oscillation of Boost Converter on Solar Panels*. Supervisor: Ir. Wijono, MT, Ph.D. and Dr. Tri Nurwati, ST, MT

The utilization of New and Renewable Energy, which is currently being widely applied, is solar cells or photovoltaic cells that convert sunlight energy into electrical energy. The voltage generated by solar cells depends on the conditions of sunlight intensity received by solar cells at all times. So a method is needed to track the maximum power point of a changing solar cell using the Maximum Power Point Tracker (MPPT). A converter to control the voltage of solar cells is used. The type of converter used is the Boost Converter, which changes the solar cells' output voltage to a bigger one. However, the output voltage generated by the Boost Converter has disadvantages such as oscillations. Therefore, to reduce oscillations, a controller or controller is needed on the Boost Converter.

In this study, the SMC method's application to the Boost Converter system was carried out to reduce the oscillation of the Boost Converter output voltage. The input of the Boost Converter is the output of solar cells, which varies depending on changes in sunlight irradiation. The research was carried out by simulating the MATLAB Simulink simulated on open loop and close loop systems. Later, the settling time and the difference in output voltage before the disturbance and after the disturbance will be analyzed in the form of varying input voltages and varying loads.

Based on the research analysis, the SMC controller's output voltage can accelerate the settling time of the output voltage from the open-loop settling time value. When there is a change in irradiation at a certain time that causes a voltage spike, the SMC controller can improve the voltage recovery time faster than the open-loop system. When the load R varies, the voltage generated by the solar cell and the boost converter's output voltage increases with the increase in R load. The settling time when the load R changes, the SMC controller has a settling time that is faster than the Open Loop settling time.

Keywords— *Photovoltaic Cells, MPPT, Boost Converter, Sliding Mode Control (SMC), settling time, recovery time.*

DAFTAR ISI

RINGKASAN **i**

KATA PENGANTAR..... **iii**

DAFTAR ISI **iv**

DAFTAR GAMBAR..... **v**

DAFTAR TABEL **viii**

DAFTAR LAMPIRAN..... **ix**

BAB I PENDAHULUAN..... **1**

 1.1 Latar Belakang 1

 1.2 Problem Riset..... 1

 1.3 Solusi..... 2

 1.4 Rumusan Masalah 2

 1.5 Tujuan Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **4**

 2.1 Sel Surya 4

 2.2 Algoritma *Incremental Conductance Method* 10

 2.3 DC-DC Converter 12

 2.4 Switching Converter 12

 2.5 Boost Converter 13

 2.6 Pemodelan State Space Averaging 18

 2.6.1 Analisa Saat Kondisi Steady State ketika Sakelar Terbuka..... 19

 2.6.2 Analisa Saat Kondisi Steady State ketika Sakelar Tertutup 21

 2.7 Sistem Kontrol 23

 2.8 Sistem Orde..... 24

 2.8.1 Respon Sistem Orde satu 24

 2.8.2 Sistem Orde dua 25

 2.9 Analisis tanggapan peralihan 26

 2.10 Osilasi 29

 2.11 Sliding Mode Controller 30

BAB III METODE PENELITIAN..... **34**

 3.1 Metode yang digunakan 34

 3.2 Diagram alir 35

 3.2.1 Diagram alir sel surya..... 35

 3.2.2 Diagram alir algoritma ICM..... 36

 3.2.3 Diagram alir Boost Converter dengan pengendali SMC..... 38

 3.3 Perancangan Simulasi Sistem 41

 3.4 Pengujian..... 42

 3.4.1 Pengujian ketika tegangan masukan berubah terhadap waktu tertentu 42

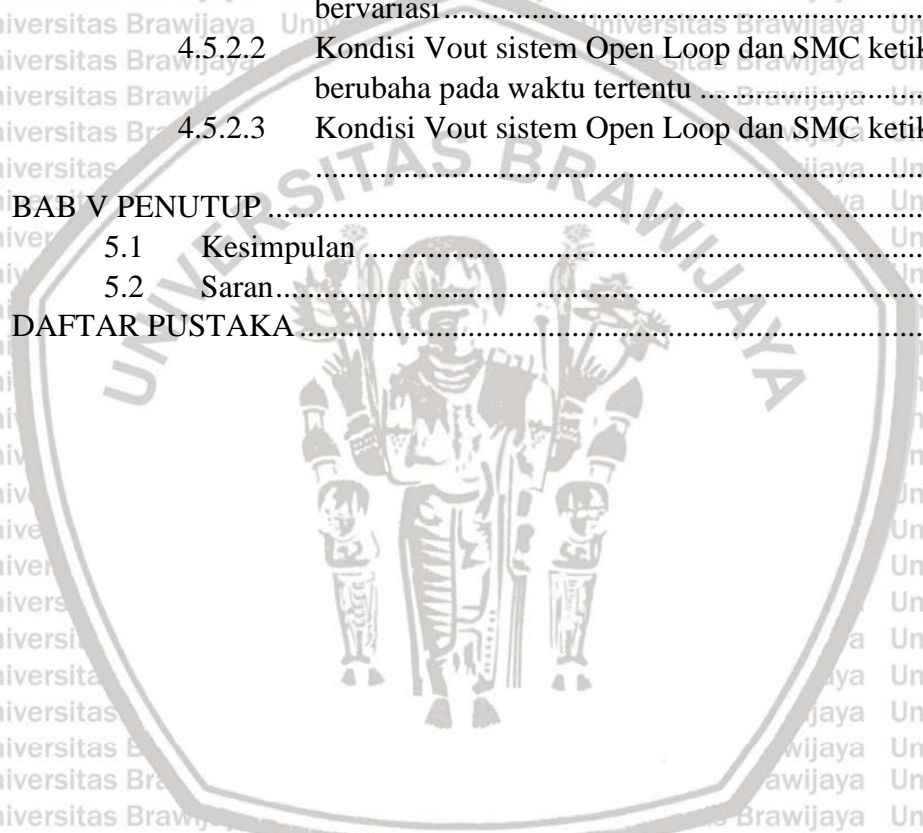
 3.4.2 Pengujian ketika beban berubah terhadap waktu tertentu 42

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN **44**

 4.1 Spesifikasi sel surya..... 44

 4.2 Spesifikasi komponen Boost Converter..... 45

4.3	Desain sistem MPPT Boost Converter Open Loop	46
4.4	Desain pengendali sistem MPPT Boost Converter menggunakan SMC	47
4.5	Hasil simulasi Vpv dan Vout	48
4.5.1	Hasil simulasi Vpv	48
4.5.1.1	Kondisi V(pv) sistem Open Loop dan SMC ketika Iradiasi bervariasi	48
4.5.1.2	Kondisi V(pv) kondisi Open Loop dan SMC ketika Iradiasi berubah pada waktu tertentu	52
4.5.1.3	Kondisi V(pv) sistem Open Loop dan SMC ketika R berubah	57
4.5.2	Hasil simulasi Vout	59
4.5.2.1	Kondisi Vout sistem Open Loop dan SMC ketika Iradiasi bervariasi	59
4.5.2.2	Kondisi Vout sistem Open Loop dan SMC ketika Iradiasi berubah pada waktu tertentu	63
4.5.2.3	Kondisi Vout sistem Open Loop dan SMC ketika R berubah	67
BAB V PENUTUP		70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA		71



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tegangan Keluaran Boost Converter Open Loop 2

Gambar 2.1 Efek Foto-Listrik 4

Gambar 2.2 Rangkaian Ekvivalen Sel Surya 5

Gambar 2.3 Kurva Karakteristik I-V Dan P-V Pada Sel Surya 8

Gambar 2.4 Titik Mpp Karakteristik I-V Dan V-P Sel Surya 9

Gambar 2.5 Rangkaian Ekvivalen Switching 12

Gambar 2.6 Tegangan Keluaran 12

Gambar 2.7 Rangkaian Boost Converter 13

Gambar 2.8 Rangkaian Ekvivalen Saat Switch Tertutup 14

Gambar 2.9 Rangkaian Ekvivalen Saat Switch Terbuka 15

Gambar 2.10 Sistem Orde satu 24

Gambar 2.11 Respon Unit Step sistem Orde satu 25

Gambar 2.12 Sistem Orde dua 25

Gambar 2.13 respon Unit Step Sistem Orde dua 27

Gambar 2.14 Grafik Pengendali Sliding Mode 31

Gambar 3.1 Blok Diagram Sel Surya 35

Gambar 3.2 Karakteristik Sel Surya Msx 60 36

Gambar 3.3 Flowchart Algoritma Incremental Conductance Method 37

Gambar 3.4 Blok Diagram Sel Surya Dengan Mppt 38

Gambar 3.5 Diagram Alir Boost Converter Menggunakan Sliding Mode 40

Gambar 3.6 Blok Diagram Sel Surya Dengan Mppt Yang Diimplementasikan Pada Boost Converter Dengan Pengendali Smc 41

Gambar 4.1 Karakteristik sel surya BP MSX60 pada simulink MATLAB 44

Gambar 4.2 (a). grafik I-V sel surya (b). grafik P-V sel surya 45

Gambar 4.3 Desain rangkaian sistem MPPT *Boost Converter* sistem *Open Loop* 46

Gambar 4.4 Desain rangkaian sistem MPPT Boost Converter menggunakan kontrol SMC 48

Gambar 4.5 Grafik settling time kondisi open loop dan kondisi SMC 50

Gambar 4.6 Hasil simulasi V(pv) iradiasi 400 kondisi open loop 50

Gambar 4.7 Hasil simulasi V(pv) iradiasi 1000 kondisi *open loop* 51

Gambar 4.8 Hasil simulasi $V(pv)$ radiasi 400 kondisi SMC..... 51

Gambar 4.9 Hasil simulasi $V(pv)$ radiasi 1000 kondisi SMC..... 52

Gambar 4.10 Grafik *recovery time* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC.... 54

Gambar 4.11 grafik deviasi tegangan sel surya kondisi open loop dan menggunakan kontrol SMC..... 55

Gambar 4.12 hasil simulasi $V(pv)$ kondisi open loop ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu..... 56

Gambar 4.13 Hasil simulasi $V(pv)$ kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu..... 57

Gambar 4.14 Grafik *settling time* $V(pv)$ kondisi Open Loop dan SMC..... 59

Gambar 4.15 Grafik perbandingan *settling time* V_{out} kondisi *Open Loop* dan SMC..... 60

Gambar 4.16 Hasil simulasi V_{out} radiasi 400 kondisi *open loop* 61

Gambar 4.17 Hasil simulasi V_{out} radiasi 1000 kondisi *open loop* 61

Gambar 4.18 Hasil simulasi V_{out} radiasi 400 kondisi SMC 62

Gambar 4.19 Hasil simulasi V_{out} radiasi 1000 kondisi SMC 63

Gambar 4.20 Grafik *recovery time* V_{out} kondisi *Open Loop* dan SMC..... 65

Gambar 4.21 Grafik deviasi tegangan V_{out} kondisi *Open Loop* dan SMC..... 65

Gambar 4.22 Hasil simulasi V_{out} kondisi *Open Loop* ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu..... 66

Gambar 4.23 Hasil simulasi V_{out} kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu..... 67

Gambar 4.24 Grafik *settling time* V_{out} kondisi sistem *Open Loop* dan SMC R berubah 69

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Komponen Boost Converter 46

Tabel 4.2 Hasil uji tegangan sel surya Open Loop ketika iradiasi bervariasi 49

Tabel 4.3 Hasil uji tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC 49

Tabel 4.4 Hasil uji tegangan sel surya iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi open loop 53

Tabel 4.5 Hasil uji tegangan sel surya iradiasi berubah pada waktu tertentu menggunakan SMC 54

Tabel 4.6 Hasil uji tegangan sel surya beban R bervariasi kondisi *Open Loop* 58

Tabel 4.7 Hasil uji tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC 58

Tabel 4.8 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter Open Loop* 59

Tabel 4.9 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter menggunakan pengendali SMC 60

Tabel 4.10 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter* iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi open loop 64

Tabel 4.11 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter* iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi *SMC* 64

Tabel 4.12 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter R berubah kondisi *open loop* 68

Tabel 4.13 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter R berubah menggunakan kontrol SMC 68

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rangkaian Subsistem SMC..... 74

Lampiran 2 Hasil pengujian Vpv Open Loop Iradiasi 200, 600 dan 800..... 74

Lampiran 3 Hasil pengujian simulasi Vpv menggunakan SMC iradiasi 200, 600 dan 800..... 75

Lampiran 4 Hasil pengujian simulasi Vout Open Loop iradiasi 200, 600 dan 800..... 77

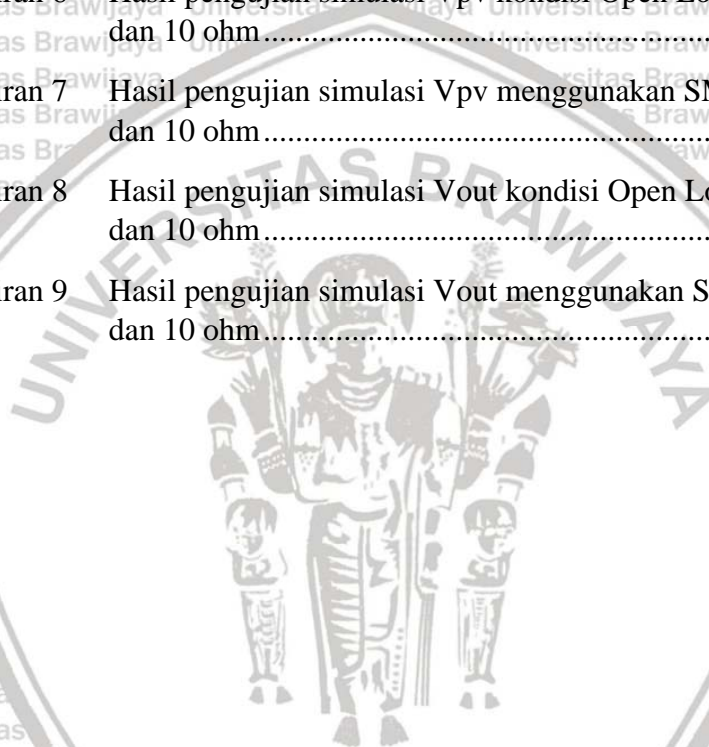
Lampiran 5 Hasil pengujian simulasi Vout menggunakan SMC iradiasi 200, 600 dan 800..... 78

Lampiran 6 Hasil pengujian simulasi Vpv kondisi Open Loop R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm..... 80

Lampiran 7 Hasil pengujian simulasi Vpv menggunakan SMC R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm..... 82

Lampiran 8 Hasil pengujian simulasi Vout kondisi Open Loop R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm..... 85

Lampiran 9 Hasil pengujian simulasi Vout menggunakan SMC R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm..... 87



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

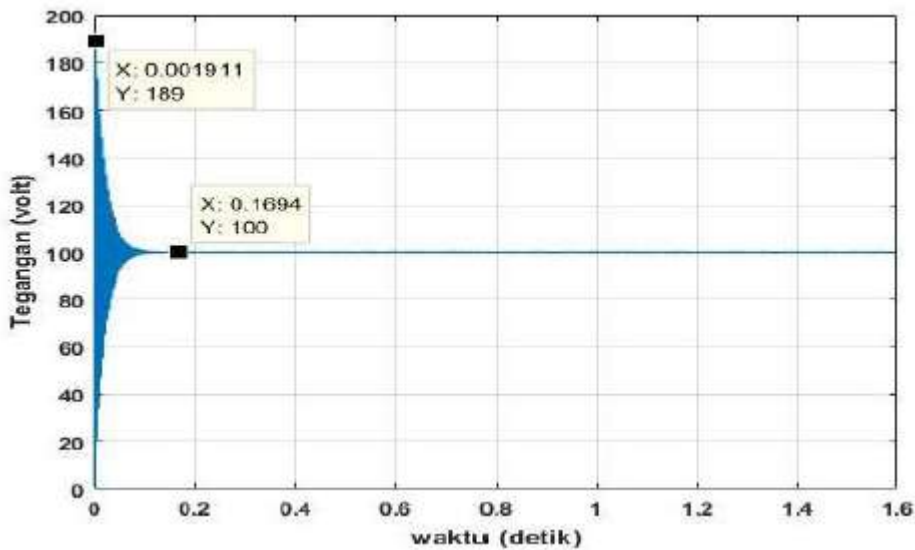
Pemanfaatan Energi Baru dan Terbarukan yang saat ini sedang banyak diaplikasikan adalah sel surya atau *sel photovoltaic*. Sel surya atau *sel photovoltaic* adalah suatu perangkat atau komponen yang bekerja berdasarkan efek fotolistrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik (Karni et al., 2018). Namun, salah satu kendala dalam pemanfaatan sel surya adalah tegangan keluaran yang dihasilkan tidak stabil. Hal ini dikarenakan tegangan yang dihasilkan tergantung kondisi intensitas cahaya matahari yang diterima oleh sel surya di sepanjang waktu. (Suwitno et al., 2017:62). Karena keluaran sel surya berubah tergantung iradiasi dan suhu, maka dibutuhkan metode untuk melacak titik daya maksimum sel surya yang berubah menggunakan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

MPPT berfungsi untuk mencari titik kerja optimal sel surya. Metode yang banyak digunakan adalah *Incremental Conductance Method* (ICM). Metode ini sederhana namun tetap memiliki kemampuan dalam menentukan titik daya maksimum dengan baik tanpa terpengaruh berbagai perubahan pada sel surya seperti penuaan, perubahan kondisi lingkungan, penurunan kemampuan sel surya (Liu & Lope, 2004).

Apabila tegangan keluaran sel surya yang tidak stabil tersebut terus diabaikan akan mengakibatkan pemakaian kurang optimal dan dapat mempercepat kerusakan alat-alat elektronik. Untuk mengatasi hal ini maka perlu dikembangkan DC-DC konverter yang mampu menstabilkan tegangan keluaran (Taufik, 2017:B41.1). Jenis konverter yang digunakan untuk mengubah besaran DC menjadi besaran DC yang lebih besar disebut dengan *Boost Converter* (Barhoumi et al, 2016). Tegangan DC yang dibutuhkan juga harus teregulasi dengan baik. Untuk menciptakan tegangan yang teregulasi dengan baik, *Boost Converter* membutuhkan sebuah pengendali.

1.2 Problem Riset

Problem yang muncul adalah terjadinya osilasi pada tegangan keluaran *Boost Converter* seperti contoh pada gambar 1.1. Osilasi ini disebabkan oleh tegangan masukan dari *Boost Converter* yang berubah-ubah.



Gambar 1.1 Tegangan keluaran Boost Converter Open Loop

1.3 Solusi

Pada penelitian ini diusulkan penerapan metode *Sliding Mode Control* untuk mengatasi osilasi yang terjadi pada *Boost Converter*. SMC atau pengendali *sliding mode* memiliki masukan berupa *sliding surface* atau persamaan error yang didapat dari persamaan model matematis (*state space averaging*) tegangan *Boost Converter*, dengan referensi yang digunakan adalah referensi tegangan. Untuk keluaran SMC tersebut berupa persamaan *duty cycle* (U) yang terdiri dari persamaan U_{eq} dan U_n . Sinyal keluaran dari pengendali *sliding mode* akan menjadi *duty* yang akan mengatur *gate* pada MOSFET pada sistem *Boost Converter*, sehingga tegangan keluaran pada sistem *Boost Converter* akan lebih terkendali. Diharapkan dengan penerapan aplikasi metode *Sliding Mode Control* tersebut osilasi bisa teredam pada level seminimal mungkin.

1.4 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana menentukan parameter persamaan kontrol SMC?
2. Bagaimana penerapan metode SMC pada *Boost Converter* dalam memperkecil osilasi dan mempertahankan tegangan keluaran sesuai dengan tegangan referensi saat terjadi perubahan parameter?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menerapkan metode *Sliding Mode Control* (SMC) sebagai kontrol untuk memperkecil osilasi yang terjadi pada tegangan keluaran *Boost Converter* ketika tegangan masukan bervariasi dan beban bervariasi.

1.6 Hipotesa Penelitian

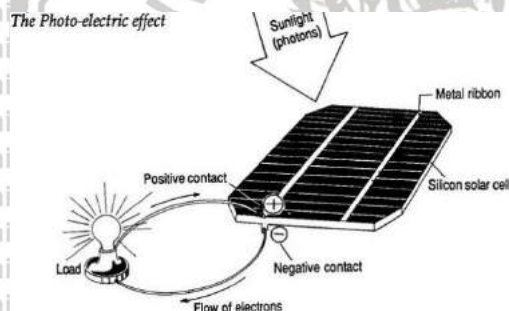
Dengan penerapan *Sliding Mode Control* (SMC) pada *Boost Converter*, maka osilasi yang terjadi pada tegangan keluaran *Boost Converter* bisa diperkecil dan tegangan keluaran bisa terkendali.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Energi surya dapat langsung dikonversi menjadi energi listrik, melalui cahaya yang diterima oleh suatu sel surya. Prinsip perubahan energi cahaya menjadi energi listrik ini disebut sebagai efek foto-listrik pada gambar 2.1, sehingga perangkat suryanya dikenal dengan istilah *photovoltaic* (PV). Dengan demikian prinsip pembangkitan listrik sama dengan prinsip pengaktifan elektron pada bahan semikonduktor melalui proses ionisasi foton (*photoionization*), sehingga terjadi aliran elektron melalui media penghantar yang dihubungkan dengan beban. Pita logam di punggung sel berfungsi sebagai kontak positif, sedangkan lapisan logam di punggung sel berfungsi sebagai kontak negatifnya (Wibawa,2017).



Gambar 2.1 Efek foto-listrik

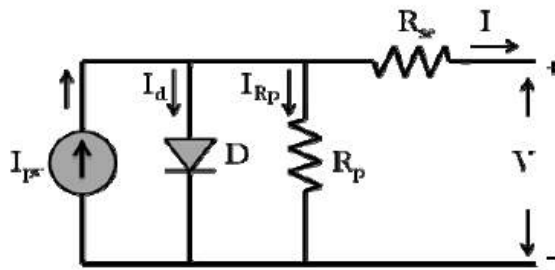
Sumber: Wibawa (2017)

Bagian terkecil dari pembangkit listrik surya disebut sebagai sel surya (*solar cell*). Bahan dasar penyusun sel surya ini adalah bahan semikonduktor, seperti: *silikon*, *germanium*, *galium*, *indium*, dan *cadmium*, yang memiliki ketebalan hanya beberapa mikron saja. Yang paling banyak digunakan sebagai bahan dasar utama adalah silikon. Makin tinggi temperatur, makin rendah tegangan pembangkitannya. Temperatur operasional sel surya berkisar antara 25-60 derajat celsius, dengan daya pembangkitan berkisar antara 50-100 mW/cm², dan dengan efisiensi sekitar 20% sampai 30%. Sekumpulan sel surya yang saling terinkoneksi akan membentuk sebuah modul surya (*solare module*). Tegangan kerja sebuah modul surya berkisar antara 0,3-0,8 m². Daya nominal yang bisa dibangkitkan antara 30-70 Watt per modul. Sedangkan sistem

pembangkitan dengan kapasitas lebih besar biasanya tersusun atas beberapa modul yang saling terkoneksi satu sama lain. Kumpulan modul surya tersebut dikenal dengan istilah *solar array*. Sebuah *solar array* bisa terdiri atas puluhan bahkan ratusan modul surya (Wibawa, 2017).

Tegangan dan arus yang dihasilkan oleh satu sel PV sangat rendah. Jadi, sel surya saling berhubungan dalam kombinasi seri-paralel untuk mencapai daya yang diinginkan.

Tegangan yang diinginkan dihasilkan dengan menghubungkan sel surya secara seri dan arus yang diinginkan dihasilkan dengan menghubungkan sel secara paralel. Koneksi seri sel yang dikenal sebagai modul PV biasanya memiliki 28, 36 atau 54 sel di dalamnya dan array adalah koneksi paralel modul (Mohammed, 2014).



Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen sel surya

Sumber: Mohammed (2014)

Gambar 2.2 adalah rangkaian ekuivalen sel surya I_{ph} adalah arus yang dihasilkan oleh sel surya hasil konversi dari energi matahari. Sel surya memiliki suatu PN junction yang direpresentasikan oleh sebuah dioda, dimana arus yang mengalir pada dioda tersebut adalah I_d . Sedangkan R_s adalah hambatan yang merepresentasikan sebagai daya yang terbuang karena resistivitas bahan dan R_{sh} adalah hambatan yang merepresentasikan daya yang terbuang karena adanya hubung singkat pada daerah emitor atau karena adanya *shunt* sepanjang batasan sel. Keluaran dari sel surya adalah arus I_{pv} dan tegangan V_{pv} .

Dengan menggunakan analisa hukum arus kirchoff pada rangkaian ekuivalen tersebut, maka rangkaian tersebut dapat direpresentasikan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \dots \dots \dots (2-1)$$

Karena arus I_{ph} adalah arus yang dihasilkan dari proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik, maka arus I_{ph} ini nilainya berubah-ubah tergantung pada

perubahan iradiasi (λ) dan suhu sel surya (T_c). Iradiasi adalah turunan radiasi cahaya terhadap waktu yang menyatakan daya yang dihasilkan dari radiasi elektromagnetik cahaya pada suatu permukaan. Persamaan (2-2) adalah persamaan yang merepresentasikan hubungan I_{ph} dengan λ dan T_c

$$I_{ph} = (I_{sc}\lambda/\lambda_{ref}) + K_I(T_c - T_{ref}) \dots\dots\dots (2-2)$$

I_d adalah arus yang mengalir pada dioda dan memiliki persamaan pada (2-3) yaitu:

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{A k T_c} \right) - 1 \right\} \dots\dots\dots (2-3)$$

I_s adalah arus saturasi dari sel surya dan memiliki hubungan dengan suhu sel surya sesuai dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{q E_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{k A} \right) \dots\dots\dots (2-4)$$

Sementara itu arus I_{rs} yang merupakan arus *reverse saturation* dapat diperoleh berdasarkan pada persamaan:

$$I_{RS} = I_{sc} / \left(e^{\frac{q V_{oc}}{A k T_c}} - 1 \right) \dots\dots\dots (2-5)$$

Maka persamaan dapat ditulis seperti persamaan berikut untuk memperoleh persamaan karakteristik dari I_{pv}

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{A k T_c} \right) - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{SH}} \dots\dots\dots (2-6)$$

Berikut adalah keterangan variabel yang terdapat pada persamaan 2-1 sampai 2-6:

I_{pv} = Arus keluaran sel surya (Ampere)

I_{ph} = Arus hasil konversi energi (Ampere)

I_o = Arus saturasi sel surya (Ampere)

V_{pv} = Tegangan keluaran sel surya (Volt)

I_{sc} = Arus hubung singkat rangkaian (Ampere)

λ = Iradiasi (W/m^2)

λ_{ref} = Iradiasi referensi (W/m^2)

T_c = Suhu sel surya (Kelvin)

T_{ref} = Suhu referensi sel surya (Kelvin)

K_I = Koefisien suhu

I_{RS} = Arus reverse saturation (Ampere)

K = Konstanta Boltzman [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K]

A = Ideality Factor

q = Muatan Elektron [$1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb]

V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka (Volt)

I_{sc} dan V_{oc} diukur pada kondisi suhu $T_{ref} = 25$ °C dan iradiasi $\lambda_{ref} = 1000$ W/m².

T_{ref} dan λ_{ref} merupakan kondisi pengukuran standar yang terdefinisi pada IEC 61215

International Standard. Nilai I_{sc} dan V_{oc} ini dapat diketahui melalui datasheet sel surya

tersebut. Sedangkan faktor idealitas (A) memiliki nilai yang berbeda tergantung pada

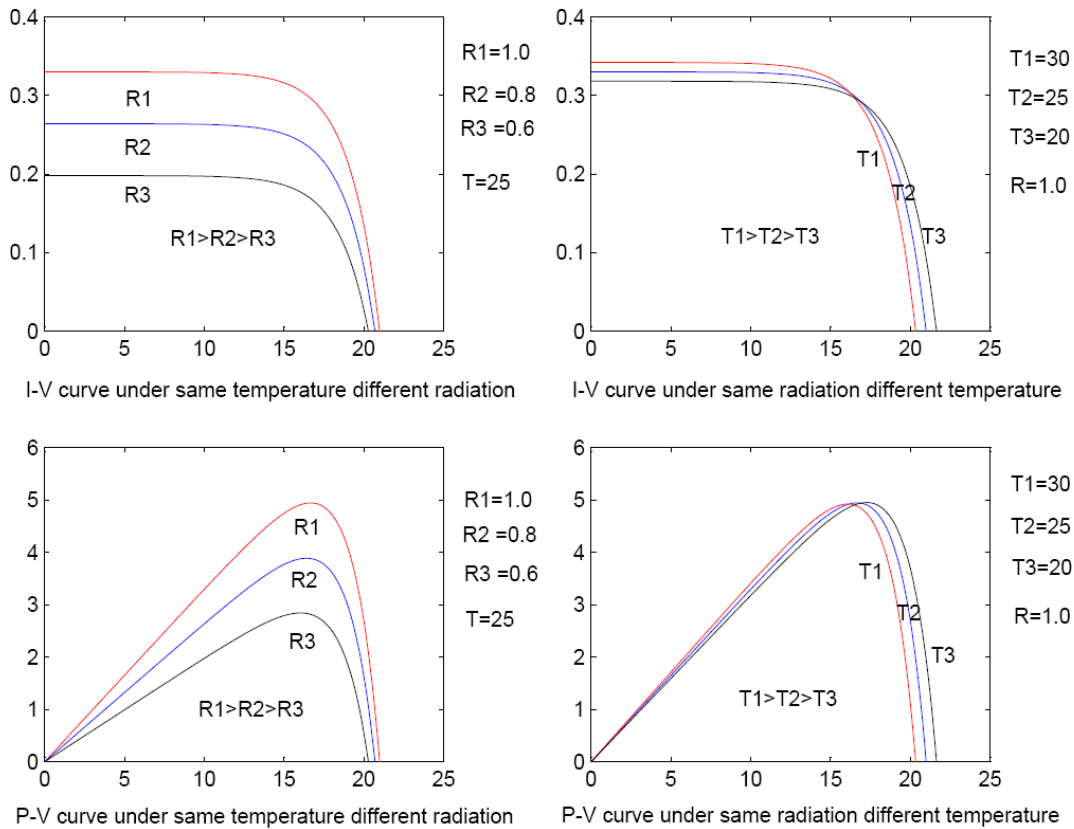
jenis material yang digunakan sebagai bahan semikonduktor sel surya, pada umumnya

berkisar antara 1 dan 2. (Tsai, Tu, & Su, 2008). Melalui persamaan karakteristik sel surya

di atas maka kemudian dapat diperoleh kurva hubungan antara arus keluaran (I_{pv}) dan

tegangan keluaran (V_{pv}) serta kurva hubungan antara daya keluaran (P_{pv}) dengan

tegangan keluaran V_{pv} dalam grafik seperti pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Kurva karakteristik I-V dan P-V pada sel surya

Sumber: Yi & Lu fa (2009)

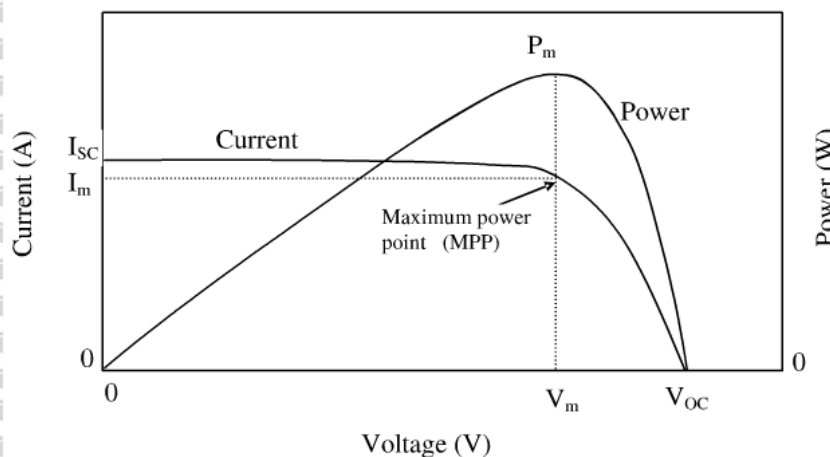
Seperti yang dilihat pada gambar diatas, grafik hubungan antara I dan V memiliki bentuk seperti 2 gambar teratas, sedangkan grafik hubungan antara P dan V memiliki bentuk seperti 2 gambar di bawahnya. Grafik kiri atas menunjukkan 3 buah kurva I(V) yang terbentuk dengan nilai iradiasi yang berbeda-beda dengan suhu yang dijaga konstan. Sedangkan grafik kiri bawah menunjukkan 3 buah kurva P(V) dengan nilai iradiasi yang bervariasi. Variasi nilai iradiasi dapat dilihat pada keterangan grafik dimana satuan dari parameter iradiasi tersebut adalah kW/m^2 . Grafik kanan atas menunjukkan 3 buah kurva I(V) yang terbentuk dengan nilai suhu yang berbeda dengan nilai iradiasi dijaga konstan, sedangkan grafik kanan bawah menunjukkan kurva P(V) dengan variasi suhu tersebut. Variasi suhu juga dapat dilihat pada keterangan grafik.

Grafik I(V) menunjukkan bahwa sel surya dapat beroperasi pada tegangan dan arus keluaran yang berbeda-beda dengan daerah operasi yang cukup luas. Grafik P(V) menunjukkan daya keluaran sel surya yang dihasilkan untuk tiap daerah operasi tegangan keluaran. Dengan bentuk grafik P(V) seperti gambar 2.3 di atas dapat disimpulkan bahwa

tiap sel surya memiliki titik tegangan operasi optimal dimana pada titik tersebut daya keluaran yang dihasilkan oleh sel surya berada pada nilai maksimal. Titik tegangan operasi optimal ini bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan (nilai suhu dan iradiasi). Hal ini dapat dilihat pada kedua grafik P(V).

Daya yang dihasilkan oleh satu sel surya saja tidaklah cukup besar. Oleh karena itu, biasanya sel-sel surya digabungkan dalam suatu modul sel surya agar mampu menghasilkan daya yang cukup besar dan dapat digunakan. Suatu modul Sel Surya terdiri atas beberapa sel surya yang dihubungkan baik secara seri ataupun paralel tergantung pada konfigurasi yang digunakan. Berdasarkan (Tsai, Tu, & Su, 2008), bila terdapat sejumlah NP sel surya yang terpasang paralel dan sejumlah NS sel surya yang terpasang seri pada suatu modul sel surya, maka modul sel surya tersebut memiliki persamaan karakteristik seperti pada persamaan (2-7).

$$I_{pv} = I_L N_p - I_o N_p \left(e^{\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{N_s A K T C}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} N_p / N_s + R_S I_{PV}}{R_{sh}} \quad (2-7)$$



Gambar 2.4 Titik MPP karakteristik I-V dan V-P sel surya

Sumber: Mohammed (2014)

Karakteristik I-V dan P-V ditunjukkan pada gambar 2.4. Pada rangkaian terbuka tegangan *open circuit* (V_{oc}) adalah tegangan maksimum sel surya pada I=0 dan arus hubung singkat (I_{sc}) adalah arus sesuai dengan hubung singkat V=0. Sel PV menghasilkan daya maksimum hanya pada satu titik dan titik tersebut disebut dengan

Maximum Power Point (MPP). I_m , V_m dan P_m pada grafik adalah arus maksimum, tegangan maksimum, dan daya maksimum sel surya. (Mohammed, 2014).

2.2 Algoritma *Incremental Conduction Method* (ICM)

Sel surya dapat memiliki titik kerja yang berubah-ubah sesuai dengan grafik hubungan $I(PV)$ dan $V(PV)$ pada Gambar 2.2 di atas. Selain itu, perubahan suhu atau iradiasi juga akan menyebabkan kurva IPV - VPV berubah. Agar sel surya ini dapat terus bekerja pada titik optimalnya, yaitu titik dimana daya yang dihasilkan maksimal, maka diperlukan suatu algoritma yang mampu menemukan titik operasi optimal sel surya. Algoritma ini disebut sebagai algoritma *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

Dari berbagai literatur, teknik MPPT dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan implementasinya, yaitu: *heuristic technique* dan *model based technique*. Teknik *heuristic* biasanya memiliki ide-ide dan implementasi yang sederhana, tetapi memerlukan beberapa iterasi sebelum menemukan MPP. Sedangkan teknik model based adalah teknik mengeksploitasai baik generator, converter, atau model-model beban dan memiliki kecepatan pelacakan yang sangat cepat dengan penambahan kompleksitas biaya dan sensor (Combining Model-Based and Heuristic Techniques) (Mahmoud, Abdelwahed, & El-Saadany, 2016; Xiao et al., 2011).

Beberapa teknik dari *heuristic* diantaranya adalah *perturb and observe (P&O) method*, *hill climbing technique*, *fuzzy control*, *power-voltage differentiation*, *online method*, dan *incremental conductance method*. Proses operasi dalam metode ini terdiri dari tiga langkah; 1). Mengganggu system panel surya, 2). Mengukur respon terhadap gangguan dan 3). Membuat koreksi umpan balik yang sesuai. Kelompok dalam teknik ini tidak memerlukan data parametrik dari generator PV, yang memiliki kompleksitas komputasi rendah tetapi menuntut sensor untuk mengukur tegangan dan arus dari generator PV. Kelemahan utama dari teknik ini adalah terkait dengan jumlah iterasi yang diperlukan untuk menemukan MPP (Hartmann, Vitorino, Correa, & Lima, 2013).

Model based MPPT, dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari teknik *heuristic* dan meningkatkan dinamika pelacakan MPPT. Model based MPPT membutuhkan pengetahuan tentang system panel surya serta pengukuran iradiasi dan temperatur untuk menentukan MPP analitis. Secara keseluruhan, model based MPPT memberikan respon cepat terhadap perubahan iradiasi matahari dibandingkan dengan

teknik *heuristic*, selain itu tidak memungkinkan terjadinya lompatan tegangan dari system panel surya secara cepat atau besar (Fathabadi, 2016)

Metode *Incremental Conductance Method* (ICM) merupakan jenis MPPT langsung. Metode penentuan titik daya maksimum atau titik tegangan operasi optimal dengan memanfaatkan sifat bahwa suatu fungsi, dalam hal ini adalah fungsi daya terhadap tegangan, akan mencapai titik maksimum ketika gradiennya bernilai 0. Atau sesuai dengan persamaan:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \dots\dots\dots (2-8)$$

Karena $P = V.I$, maka:

$$\frac{d(P)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \dots\dots\dots (2-10)$$

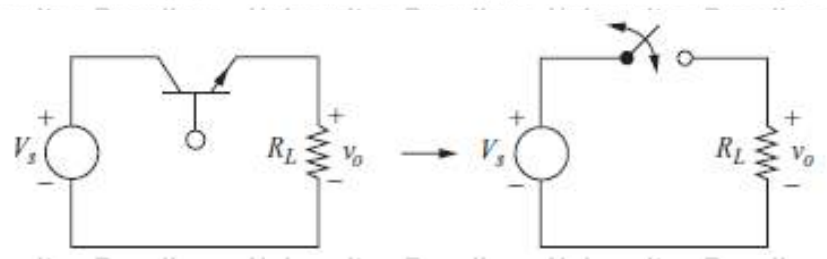
Algoritma ICM ini akan meningkatkan atau menurunkan nilai tegangan operasi hingga persamaan (2-10) tercapai (Yan, Fei, Jinjun, & Shanxu, 2008). Namun karena algoritma ICM ini memberikan peningkatan dan penurunan nilai tegangan operasi secara konstan, maka nilai tegangan operasi yang tercapai akan berosilasi disekitar titik tegangan operasi optimal.

2.3 DC-DC Converter

DC-DC Converter adalah rangkaian elektronika daya yang mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan DC dengan level yang berbeda yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Rangkaian yang digunakan pada pembahasan skripsi ini diklasifikasikan sebagai rangkaian konverter dengan *switched-mode* dan biasa disebut dengan *switching power supplies* (Hart, 2011).

2.4 Switching Converter

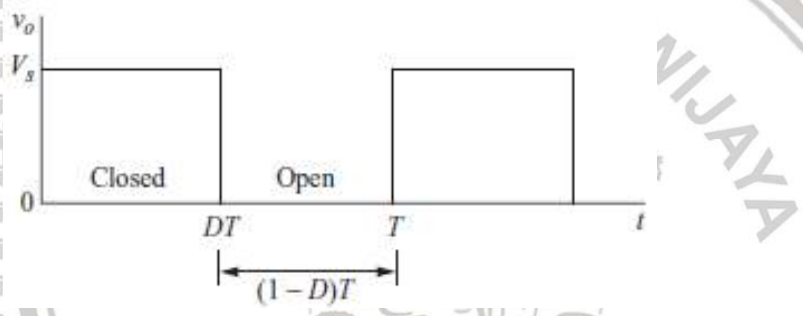
Pada rangkaian switching converter ini, transistor beroperasi sebagai *switch* elektronik. Rangkaian ini dekenal juga dengan DC-DC Chopper.



Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen switching

Sumber: Daniel W. Hart (2010: 197)

Saat beroperasi transistor akan memiliki dua kondisi yaitu kondisi ON dan kondisi OFF. Pada saat transistor kondisi ON maka tegangan keluaran akan sama dengan tegangan masukan. Pada saat transistor kondisi OFF maka tegangan keluaran akan bernilai 0.



Gambar 2.6 Tegangan keluaran

Sumber: Daniel W. Hart (2010: 197)

Kondisi ON dan OFF pada transistor menghasilkan sinyal output seperti pada gambar 2.6. Rata-rata atau komponen DC dari tegangan keluaran dapat ditentukan dari persamaan berikut.

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \dots\dots\dots(2-11)$$

Dari persamaan 2-11, komponen DC pada tegangan keluaran dikontrol dengan menyesuaikan besarnya nilai *duty ratio* atau D. *Duty ratio* adalah nilai rasio antara lamanya transistor pada kondisi ON dengan perioda T dari pulsa tegangan keluaran.

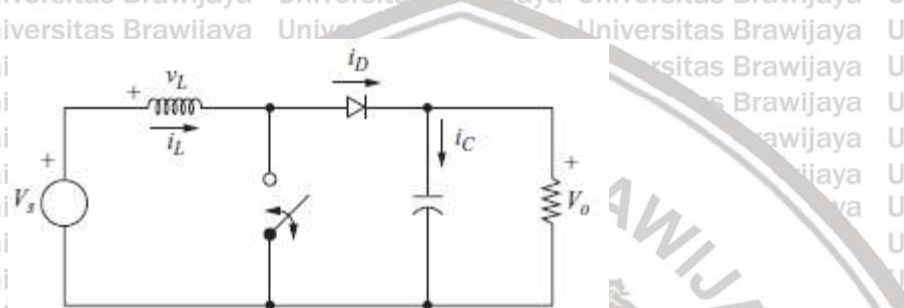
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \dots\dots\dots(2-12)$$

Dimana f adalah nilai frekuensi *switching*. Komponen DC dari tegangan keluaran akan kurang dari atau sama dengan tegangan masukan dari rangkaian tersebut.

Daya yang diserap oleh *switch* yang ideal adalah nol. Ketika *switch* terbuka atau pada kondisi OFF maka tidak akan ada arus, ketika *switch* tertutup atau pada kondisi ON maka tidak akan ada tegangan yang melewati *switch*. Sehingga, semua daya akan diserap oleh beban, dan efisiensi energinya menjadi 100 persen (Hart, 2011).

2.5 Boost Converter

Boost Converter merupakan salah satu *switching converter* dengan menggunakan elektronik *switch* yang bekerja pada kondisi ON dan OFF secara periodik. *Boost Converter* memiliki tegangan DC keluaran yang lebih besar daripada tegangan DC masukannya.



Gambar 2.7 Rangkaian *Boost Converter*

Sumber: Daniel W. Hart (2010: 212)

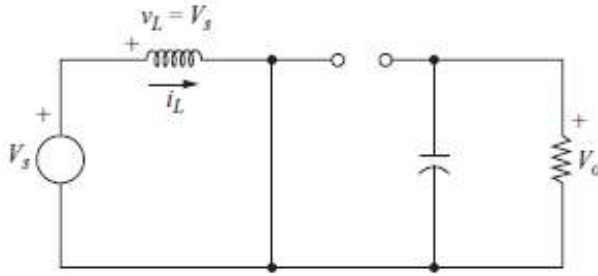
Boost Converter merupakan konverter yang tergolong tipe peralihan karena menggunakan transistor berupa MOSFET atau IGBT yang berfungsi sebagai *switching*. Konverter ini pada umumnya menggunakan masing-masing sebuah inductor, kapasitor, dan dioda.

Untuk memudahkan saat analisis, konverter ini diasumsikan dengan kondisi sebagai berikut:

1. Rangkaian beroperasi dengan kondisi *steady-state*.
2. Arus pada inductor adalah kontinyu dan selalu positif.
3. Beban yang digunakan adalah hambatan (R)
4. Semua komponen yang digunakan adalah ideal.

Lalu analisis dilanjutkan dengan memeriksa masing-masing tegangan dan arus pada inductor saat *switch* ON dan OFF

Analisi saat kondisi switch ON – ketika *switch* tertutup atau pada kondisi ON, diode akan dibias mundur. Untuk rangkaian ekivalennya dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen saat *switch* tertutup

Sumber: Daniel W. Hart (2010: 212)

Berdasarkan hukum tegangan *Kirchhoff*, tegangan pada induktor dan *switch* saat tertutup menjadi:

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \text{ atau } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \dots\dots\dots(2-13)$$

dengan:

V_L = Tegangan induktor (Volt)

V_s = Tegangan sumber (Volt)

L = Nilai induktor (Henry)

Tingkat perubahan arus menjadi konstan, sehingga arus akan meningkat secara linier saat *switch* tertutup. Perubahan arus pada induktor akan menjadi:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \dots\dots\dots(2-14)$$

dengan:

D = *Duty cycle*

T = Periode *switching* (Sekon)

Δi_L = Perubahan arus pada induktor (Ampere)

Dari persamaan diatas, didapatkan:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s DT}{L} \dots\dots\dots(2-15)$$

dengan:

Δi_L = Perubahan arus pada induktor (Ampere)

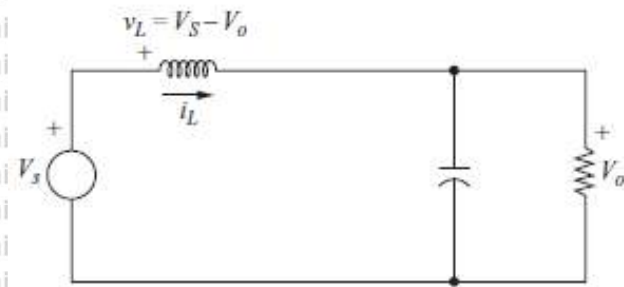
V_s = Tegangan sumber (Volt)

$D = \text{Duty cycle}$

$T = \text{Periode switching (Sekon)}$

$L = \text{Nilai inductor (Henry)}$

Analisis saat kondisi switch OFF – Pada saat switch terbuka atau kondisi OFF arus inductor tidak dapat berubah secara instan. Sehingga dioda dibias maju untuk menjadi jalur bagi arus inductor. Sehingga rangkaian ekuivalennya akan menjadi seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Rangkaian ekuivalen saat switch terbuka

Sumber: Daniel W. Hart (2010: 212)

Asumsikan bahwa tegangan keluaran V_o adalah konstan. Maka tegangan yang melewati inductor adalah

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \dots\dots\dots (2-16)$$

dengan:

$V_L = \text{Tegangan pada inductor (Volt)}$

$V_s = \text{Tegangan sumber (Volt)}$

$V_o = \text{Tegangan keluaran (Volt)}$

$L = \text{Nilai Induktor (Henry)}$

Tingkat perubahan arus pada inductor adalah konstan, sehingga arus akan berubah secara linier saat saklar terbuka atau pada kondisi OFF. Perubahan arus pada inductor saat saklar terbuka adalah

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \dots\dots\dots (2-17)$$

dengan:

$\Delta i_L = \text{Perubahan arus pada inductor (Ampere)}$

$V_s = \text{Tegangan sumber (Volt)}$

$V_o = \text{Tegangan keluaran (Volt)}$

$D = \text{Duty cycle}$

$T = \text{Periode switching (Sekon)}$

$L = \text{Nilai induktor (Henry)}$

Dari persamaan diatas, sehingga didapatkan

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \dots\dots\dots(2-18)$$

Pada saat kondisi *steady-state*, perubahan pada arus induktor harus sebesar 0.

Dengan menggunakan persamaan (2-15) dan (2-18)

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \dots\dots\dots(2-19)$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \dots\dots\dots(2-20)$$

Sehingga didapatkan persamaan V_o ,

$$V_s(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \dots\dots\dots(2-21)$$

dengan:

$V_o = \text{Tegangan keluaran (Volt)}$

$V_s = \text{Tegangan sumber (Volt)}$

$D = \text{Duty cycle}$

Tegangan induktor harus sama dengan nol selama periode beroperasi. Tegangan induktor selama satu periode *switching* dapat digambarkan dengan persamaan berikut.

$$V_L = V_s D + (V_s - V_o)(1 - D) = 0 \dots\dots\dots(2-22)$$

dengan:

$V_L = \text{Tegangan induktor (Volt)}$

$V_s = \text{Tegangan sumber (Volt)}$

$V_o = \text{Tegangan keluaran (Volt)}$

$D = \text{Duty cycle}$

Persamaan (2-21) menunjukkan bahwa ketika *switch* selalu pada kondisi terbuka atau OFF dan nilai D sama dengan 0, besar tegangan keluaran akan sama dengan besar tegangan masukan. Semakin besar nilai D, maka pembagi dari persamaan (2-21) akan semakin kecil, dan akan semakin meningkatkan nilai tegangan keluaran. Sehingga *Boost Converter* menghasilkan sebuah tegangan keluaran yang lebih besar atau sama dengan tegangan masukannya. Bagaimanapun, nilai tegangan keluaran *Boost Converter* tidak akan lebih kecil dari tegangan masukannya.

Arus pada induktor ditentukan dengan mengetahui bahwa daya dari sumber harus sama dengan daya yang diserap oleh beban resistor. Besar daya output adalah.

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = V_o I_o \dots\dots\dots(2-23)$$

Daya input adalah $V_s I_s = V_s I_L$. Dengan menyamakan persamaan daya output dengan daya input, dengan menggunakan persamaan (2-21) maka didapat persamaan.

$$P_s = P_o$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R}$$

$$V_s I_L = \frac{[V_s/(1-D)]^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2} R \dots\dots\dots(2-24)$$

Sehingga didapat persamaan untuk arus pada induktor adalah.

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_o^2}{V_s R} = \frac{V_o I_o}{V_s} \dots\dots\dots(2-25)$$

Arus maksimum dan minimum pada induktor ditentukan dengan menggunakan persamaan.

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{V_s DT}{2L} \dots\dots\dots(2-26)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} \dots\dots\dots(2-27)$$

Persamaan (2-21) bisa didapatkan dengan mengasumsikan bahwa arus induktor adalah kontinyu, dan selalu bernilai positif. Arus induktor yang kontinyu ini dibutuhkan untuk membuat nilai I_{min} bernilai positif.

Kombinasi minimum untuk induktansi dan frekuensi *switching* untuk arus kontinyu pada Boost Converter adalah sebagai berikut: (Hart, 2011, p.215)

$$(Lf)_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2} \dots\dots\dots(2-28)$$

Atau

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \dots\dots\dots(2-29)$$

Sebuah *Boost Converter* di desain untuk beroperasi pada arus kontinyu dan akan mempunyai sebuah induktor dengan nilai yang lebih besar dari L_{min} . Untuk menentukan nilai L dapat melalui persamaan berikut : (Hart, 2011, p.215)

$$L = \frac{V_s DT}{\Delta i_L} = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \dots\dots\dots(2-30)$$

Untuk menentukan kapasitansi minimum dengan persamaan sebagai berikut:
(Hart, 2011, p.216)

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_O}{V_O} \right) f} \dots \dots \dots (2-31)$$

Dengan

$\Delta V_O =$ Ripple Tegangan Keluaran

2.6 Pemodelan State Space Averaging

State Space Averaging pada sistem kelistrikan modern berskala besar banyak digunakan untuk penyelesaian masalah kontrol (Robandi, 2009 , p.33). *State Space Averaging* dapat digunakan sebagai metode dasar untuk pemodelan matematika *steady state* dan dinamis dari *Boost Converter*. *State space averaging* memiliki persamaan umum yang berbentuk seperti berikut :(Tan & Hoo, 2015, p.42)

$$\dot{x} = Ax + Bu \dots \dots \dots (2-32)$$

Dengan:

\dot{x} = Turunan Variabel *State Space Averaging*

A= Sistem Matrik Plan (*Boost Converter*)

x= Variabel *state space averaging*

B= Sistem Matrik Plan (*Boost Converter*)

u= Masukan Sistem

Dari kondisi on dan off yang dimiliki oleh saklar *Boost Converter*, maka pemodelan *State Space Averaging* pada *Boost Converter* dapat diketahui.

2.6.1 Analisa saat kondisi *steady state* ketika sakelar terbuka

Pemodelan *State Space Averaging* (SSA) pada saat kondisi saklar terbuka dilakukan dengan menggunakan prinsip dari kedua hukum Kirchoff yaitu: *Kirchoff's Voltage Law* (KVL) dan *Kirchoff's Current Law* (KCL). Kedua hukum ini digunakan untuk menurunkan persamaan matematis pada saat kondisi saklar terbuka. Menurut Daniel W. Hart (2011, p.212) dengan persmaan *Kirchoff's Voltage Law* (KVL) sebagai berikut:

$$\sum V = 0 \dots\dots\dots (2-33)$$

Kemudian dengan melihat rangkaian *Boost Converter* pada keadaan saklar terbuka makadapat didapatkan *loop* rangkaian sebagai berikut:

$$-V_s + V_L + V_C = 0 \dots\dots\dots (2-34)$$

Dengan:

V_C = Tegangan Kapasitor (Volt)

Dengan memindahkan V_s pada persamaan diatas maka didapat persamaan berikut:

$$V_s = V_L + V_C \dots\dots\dots (2-35)$$

Karena besarnya V_L sama dengan $L \frac{di_L}{dt}$ maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} + V_C \dots\dots\dots (2-36)$$

Dengan memindahkan ruas $L \frac{di_L}{dt}$ maka didiapat persamaan sebagai berikut:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_C \dots\dots\dots (2-37)$$

Menurut Daniel W. Hart (2011, p.145) dengan persamaan Kirchoff's Current Law (KCL) untuk menentukan arus dalam setiap sumber sebagai berikut :

$$\sum i = 0 \dots\dots\dots (2-38)$$

Dengan melihat rangkaian *Boost Converter* pada keadaan saklar terbuka maka dapat didapatkan *loop* rangkaian sebagai berikut:

$$i_L = i_C + i_R \dots\dots\dots (2-39)$$

Dengan:

i_C = Arus Kapasitor (Ampere)

i_R = Arus Resistor (Ampere)

Karena besarnya i_C sama dengan $C \frac{dv_C}{dt}$ dan i_R sama dengan $\frac{v_C}{R}$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$i_L = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} \dots\dots\dots (2-40)$$

Dengan memindahkan ruas $C \frac{dv_c}{dt}$ maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \dots \dots \dots (2-41)$$

Sehingga didapat persamaan matrik sebagai berikut: (Tan & Hoo, 2015, p.44)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \dots \dots \dots (2-42)$$

Dimana persamaan diatas merupakan

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} = A_{off}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = B_{off}$$

$$\begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} = x$$

$$V_{in} = u$$

Dengan menggunakan metode *State Space Averaging* perubahan arus pada induktor dan perubahan tegangan pada kapasitor dapat dimodelkan sebagai mode matematik dari *Boost Converter* dengan menggunakan persamaan (2-32)

Dengan besar A pada persamaan (2-32) sebagai berikut: (Tan & Hoo, 2015, p.44)

$$A = d \cdot A_{on} + (1 - d)A_{off} \dots \dots \dots (2-43)$$

Dengan besar B pada persamaan (2-32) sebagai berikut: (Tan & Hoo, 2015, p.44)

$$B = d \cdot B_{on} + (1 - d)B_{off} \dots \dots \dots (2-44)$$

Pada kondisi *Boost Converter* kondisi saklar terbuka variabel dari persamaan (2-43) dan (2-44) yang didapatkan hanyalah variabel Aoff, Boff, x dan u. Untuk melengkapi persamaan tersebut maka analisa saat kondisi *steady state* ketika saklar tertutup perlu dilakukan.

2.6.2 Analisa saat kondisi *steady state* ketika saklar tertutup

Pemodelan *State Space Averaging* (SSA) pada saat kondisi saklar tertutup tidak jauh berbeda dengan pemodelan pada saat saklar terbuka yaitu dengan menggunakan prinsip dari kedua hukum Kirchoff yaitu: *Kirchoff's Voltage Law* (KVL) dan *Kirchoff's Current Law* (KCL). Kedua hukum ini digunakan untuk menurunkan persamaan matematis pada saat kondisi saklar tertutup.

Menurut Daniel W. Hart (2011, p.212) dengan persamaan *Kirchoff's Voltage Law* (KVL) seperti persamaan (2-33) dan melihat rangkaian *Boost Converter* pada keadaan saklar tertutup maka dapat didapatkan loop rangkaian sebagai berikut :

$$V_S - V_L = 0 \dots\dots\dots(2-45)$$

Dengan memindahkan ruas V_S pada persamaan diatas maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_S = V_L \dots\dots\dots(2-46)$$

Karena besarnya V_L sama dengan $L \frac{di_L}{dt}$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_S = L \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots(2-47)$$

Persamaan (2-47) dibagi dengan L maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{V_S}{L} = \frac{di_L}{dt} \dots\dots\dots(2-48)$$

Menurut Daniel W. Hart (2011, p.145) dengan persamaan *Kirchoff's Current Law* (KCL) untuk menentukan arus dalam setiap sumber seperti persamaan (2-38) dan melihat rangkaian *Boost Converter* pada keadaan saklar tertutup maka dapat didapatkan loop rangkaian sebagai berikut:

$$i_C = -i_R \dots\dots\dots(2-49)$$

Karena besarnya i_C sama dengan $C \frac{dv_C}{dt}$ dan i_R sama dengan $\frac{v_C}{R}$ maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$C \frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{R} \dots\dots\dots(2-50)$$

Dengan memindahkan ruas nilai C maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{RC} \dots\dots\dots(2-51)$$

Sehingga didapatkan persamaan matrik sebagai berikut: (Tan & Hoo, 2015, p.43)

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{in} \dots\dots\dots(2-52)$$

Dimana persamaan diatas merupakan:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} = A_{on}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} = B_{on}$$

$$\begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} = x$$

$$V_{in} = u$$

Dengan menggunakan metode *State Space Averaging* perubahan arus pada induktor dan perubahan tegangan pada kapasitor dapat dimodelkan persamaan matematis dari *Boost Converter* dengan menggunakan persamaan (2-32). Dengan besar A mengacu pada persamaan (2-43) dan besar B pada persamaan (2-44). Dengan mensubstitusikan persamaan (2-42) dan (2-52) ke dalam persamaan (2-43) dan (2-44) maka didapatkan persamaan *State Space Averaging* (SSA) sebagai berikut. Dimana persamaan yang mewakili besarnya $\frac{di_L}{dt}$ dituliskan pada persamaan 2-53: (Barhoumi et al, 2016)

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} (V_S + x_2(d - 1)) \dots\dots\dots(2-53)$$

Dengan:

$$\dot{x}_1 = \text{Turunan Arus Induktor}$$

$$x_2 = \text{Tegangan Kapasitor (Volt)}$$

Dimana persamaan yang mewakili besarnya $\frac{dv_C}{dt}$ dituliskan pada persamaan 2-54 (Barhoumi et al, 2016)

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C} (x_1(1 - d) - \frac{x_2}{R}) \dots\dots\dots(2-54)$$

Dengan:

x_2 = Turunan Tegangan Kapasitor

x_1 = Arus Induktor (Ampere)

Dimana x_1 adalah arus induktor dan x_2 adalah tegangan kapasitor. Pemodelan *State Space Averaging* (SSA) ini akan digunakan untuk mensimulasikan *Boost Converter* pada matlab simulink untuk melihat karakteristik dari rangkaian *Boost Converter* dan mempermudah *Boost Converter* berintegrasi dengan sistem lain.

2.7 Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan proses pengaturan atau pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga didapatkan suatu harga atau didapatkan harga-harga dalam suatu range (jangkauan) tertentu (Yudaningtyas, 2017:1).

Dalam perencanaan sebuah sistem kontrol terdapat beberapa istilah yang harus dipahami definisinya, seperti:

1. Variabel terkontrol dan sinyal kontrol atau variabel yang dimanipulasi.

Variabel yang terkontrol adalah suatu besaran atau kondisi dari suatu sistem yang dapat diukur dan dikontrol. Sedangkan sinyal kontrol atau variabel yang dimanipulasi adalah kondisi yang muncul akibat adanya variasi dari *controller*, sehingga variabel ini mempengaruhi nilai variabel terkontrol. Biasanya, variabel terkontrol adalah keluaran dari sistem. Proses kontrol berarti menghitung nilai dari variabel terkontrol dari sistem dan menerapkan sinyal kontrol ke sistem untuk memperbaiki atau membatasi penyimpangan nilai yang diukur dari nilai yang diinginkan.

2. *Plant*

Plant merupakan objek fisik yang dikontrol, dapat berupa proses mekanis, elektrik, hidraulis maupun gabungannya. Tujuan dari adanya *plant* ini adalah untuk melakukan operasi tertentu.

3. Proses

Sebuah proses ditandai serangkaian perubahan bertahap dengan cara yang relatif tetap dan mengarah pada hasil tertentu.

4. Sistem

Suatu sistem adalah kombinasi komponen yang bekerjasama dan melakukan tujuan tertentu.

5. Gangguan

Gangguan adalah sinyal yang cenderung mempengaruhi nilai keluaran dari suatu sistem. Jika gangguan dihasilkan dalam sistem, disebut gangguan internal sementara gangguan eksternal dihasilkan di luar sistem dan sebuah masukan.

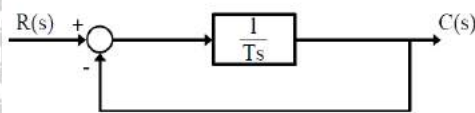
6. Kontrol Feedback (Kontrol Umpan Balik)

Kontrol umpan balik merupakan bagian dari sistem untuk menghitung selisih atau perbedaan antara nilai keluaran dari suatu sistem dengan referensi masukan dan kemudian mengubahnya menjadi sinyal umpan balik.

2.8 Sistem Orde

Sistem orde adalah fungsi alih dari masing-masing subsistem. Dalam subsistem plant, sistem orde dibagi menjadi dua yaitu: (Yudaningtyas, 2017)

2.8.1 Respon Sistem Orde Satu



Gambar 2.10 Sistem orde satu

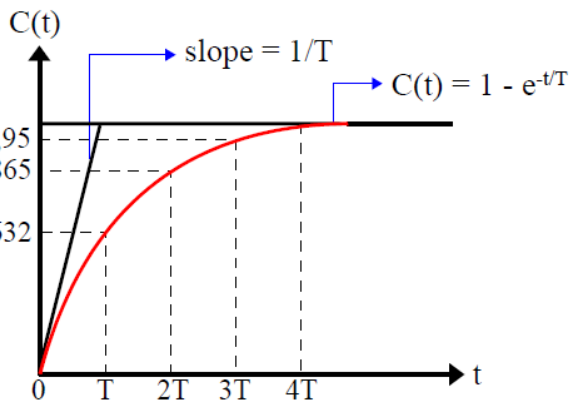
Sumber: (Yudaningtyas, 2017)

Untuk sistem orde satu memiliki fungsi alih pada persamaan 2-55.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1/T_s}{1 + 1/T_s}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T_s + 1} \tag{2-55}$$

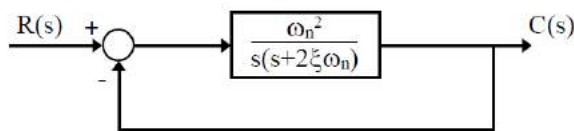
Sedangkan respon unit step sistem orde satu adalah pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Respon unit step sistem orde satu

Sumber: (Yudaningtyas, 2017)

2.8.2 Sistem orde dua



Gambar 2.12 Sistem orde dua

Sumber: (Yudaningtyas, 2017)

Untuk sistem orde dua memiliki fungsi alih sebagai berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}}{1 + \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)}}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n) + \omega_n^2}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-56)$$

Dimana,

ξ = rasio peredam sistem (damping ratio)

ω_n = frekuensi natural/alamiah tak teredam

Respon dinamis sistem orde dua dapat digambarkan dalam suku dua parameter ξ dan ω_n .

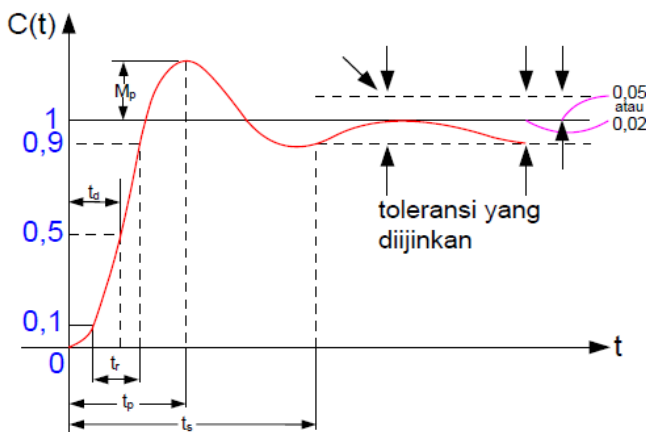
Berikut adalah jenisnya:

- 1) Apabila ($0 < \xi < 1$), sistem dikatakan kurang teredam dan respon peralihan berosilasi (*underdamped*).
- 2) Apabila ($\xi = 1$), sistem dikatakan teredam kritis (*critically damped*).
- 3) Apabila ($\xi > 1$), sistem terlalu teredam berhubungan dengan respon peralihan sistem teredam kritis dan sistem terlalu teredam tidak berosilasi (*overdamped*).
- 4) Apabila ($\xi = 0$), tanggapan peralihan tidak muncul.

2.9 Analisis tanggapan peralihan

Sistem dengan tenaga tidak dapat memberikan tanggapan seketika dan akan menunjukkan tanggapan peralihan pada gambar 2.13 walaupun diberi masukan atau gangguan. Karakteristik unjuk kerja sistem kontrol yang diinginkan dicirikan oleh suku tanggapan peralihan terhadap masukan unit step karena hal itu mudah dilakukan dan cukup drastis (Yudaningtyas, 2017).

Dengan menganalisis tanggapan peralihan atau respon transien suatu sistem, maka dapat diketahui mengenai waktu yang diharapkan untuk mencapai keadaan mantap dan nilai kesalahan atau error yang mengikuti sinyal masukan. Berikut adalah pengelompokan tanggapan peralihan suatu sistem kontrol terhadap masukan unit step:



Gambar 2.13 Respon unit step sistem orde dua

Sumber: (Yudaningtyas, 2017)

1. *Maximum Overshoot* / Lonjakan Maksimum M_p

Maximum Overshoot adalah nilai puncak kurva respons diukur dari satu.

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \dots \dots \dots (2-57)$$

Dengan,

$c(t_p)$ = nilai respons pada saat lonjakan maksimum

$c(\infty)$ = nilai respons pada saat keadaan mantap.

Overshoot maksimum terjadi pada waktu puncak atau pada

$$t = t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \dots \dots \dots (2-58)$$

Jadi dari persamaan keluaran M_p diperoleh

$$M_p = c(t_p) - 1$$

$$M_p = -e^{-\xi\omega_n(\pi/\omega_d)} \left(\cos\pi + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\pi \right)$$

$$M_p = e^{-(\xi/\omega_d)\pi}$$

$$M_p = e^{-\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)\pi} \dots \dots \dots (2-59)$$

Persen *Overshoot* maksimum adalah

$$\%M_p = e^{-(\xi/\omega_d)\pi} \times 100\% \dots \dots \dots (2-60)$$

2. *Delay time* / waktu tunda. T_d

Delay time adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai setengah nilai akhir pada saat lonjakan pertama.

3. *Rise Time* / Waktu Naik, t_r

Rise time adalah waktu yang dibutuhkan respon agar bertambah dari 0% menjadi 100% dari nilai akhir pada sistem kurang teredam.

4. *Peak Time* / Waktu Puncak, t_p

Peak time adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai puncak pertama lonjakan (maksimum). Waktu puncak dapat diperoleh dengan menurunkan $c(t)$ terhadap waktu dan menyamakannya dengan nol, atau

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_{t=t_p} = 0 = (\sin \omega_d t_p) \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t_p} \dots \dots \dots (2-61)$$

Menghilangkan persamaan:

$$\sin \omega_d t_p = 0$$

$$\omega_d t_p = 0, 2\pi, 3\pi, \dots$$

Karena waktu puncak t_p berhubungan dengan waktu puncak overshoot/lonjakan pertama, maka nilai waktu puncak tersebut adalah

$$\omega_d t_p = \pi$$

Atau

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \dots \dots \dots (2-62)$$

ω_d adalah frekuensi natural/alamiah teredam, dimana

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \dots \dots \dots (2-63)$$

Maka dengan mensubstitusikan persamaan 2-62 dan 2-63 maka didapatkan persamaan 2-64

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \dots \dots \dots (2-64)$$

5. *Settling time* / waktu turun, t_s

Settling time adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai harga tertentu dan tetap dalam range nilai akhir (biasanya 5% atau 2%). Ada dua kriteria untuk menentukan waktu turun yaitu kriteria 2% dan 5%.

Untuk kriteria 2%,

$$t_s = 4T = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\xi \omega_n} \dots \dots \dots (2-65)$$

Untuk kriteria 5%,

$$t_s = 3T = \frac{3}{\sigma} = \frac{3}{\xi \omega_n} \dots \dots \dots (2-66)$$

2.10 Osilasi

Secara umum, osilasi yang muncul pada sistem MPPT adalah karena karakteristik dari rangkaian *Boost Converter* yang merupakan rangkaian yang bekerja menggunakan prinsip switching. Karena adanya 2 kondisi pada rangkaian *Boost Converter*, yaitu pada saat *switch on* dan pada saat *switch off*, maka baik tegangan maupun arus pada *Boost Converter* akan berubah-ubah. Maka kemudian komponen L dan C yang digunakan pada *Boost Converter* akan turut mempengaruhi besarnya osilasi yang terjadi. Selain itu, algoritma ICM juga menghasilkan nilai $V(PV)_{ref}$ yang berosilasi di sekitar titik kerja optimal, sehingga algoritma ICM ini juga turut mempengaruhi osilasi pada keluaran sistem MPPT. Sementara itu, adanya waktu transien yang dibutuhkan sistem untuk mencari titik kerja yang baru disebabkan oleh algoritma ICM. Algoritma ICM mengubah nilai $V(PV)_{ref}$ sebesar 0V sampai menemukan titik $V(PV)_{ref}$ yang sesuai dengan titik kerja optimal. Karena perubahan $V(PV)_{ref}$ setiap cupliknya adalah sebesar 0V, maka tentu dibutuhkan waktu untuk mencapai titik kerja optimal yang tepat.

Komponen-komponen yang digunakan pada *Boost Converter* memberikan pengaruh pada keluaran dari *Boost Converter* bahwa besarnya *ripple* atau osilasi dari keluaran *Boost Converter* dipengaruhi oleh komponen kapasitor dari rangkaian dan nilai induktansi minimum pada induktor yang akan digunakan agar *Boost Converter* dapat bekerja di daerah kerja yang digunakan pada sistem MPPT. Perubahan nilai komponen-komponen yang digunakan pada *Boost Converter* dapat menyebabkan sistem MPPT memiliki keluaran yang berbeda.

2.11 Sliding Mode Controller (SMC)

Pengendali *Sliding Mode* adalah suatu sistem pengendalian yang bertujuan untuk mengarahkan keadaan lintasan yang dikontrol menuju *sliding surface* (Barhoumi et al, 2016). Pengendali *Sliding Mode* ini merupakan salah satu pengendali yang memiliki kemampuan untuk menjaga stabilitas sistem yang dikendalikan dan memiliki daya tahan yang baik dalam perubahan variasi parameter yang dikendalikan (Barhoumi et al, 2016). Dalam perancangan SMC terdapat tiga tahapan penting yang harus dilakukan. Yang pertama adalah bentuk dari *sliding surface* yang digunakan. Langkah selanjutnya adalah merancang persamaan kontrol berdasarkan *sliding surface* yang dibentuk. Setelah perancangan persamaan kontrol selesai maka langkah berikutnya adalah menerapkannya pada sistem yang dikendalikan.

Sliding Surface merupakan fungsi error. Jika plant yang digunakan adalah converter maka referensi untuk membentuk fungsi error ini dapat berasal dari nilai error arus, tegangan, maupun daya dari converter. Persamaan umum dari *sliding surface* dapat dituliskan sebagai berikut : (Teodorescu et al, 2015, p.699)

$$S = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \dots \dots \dots (2-67)$$

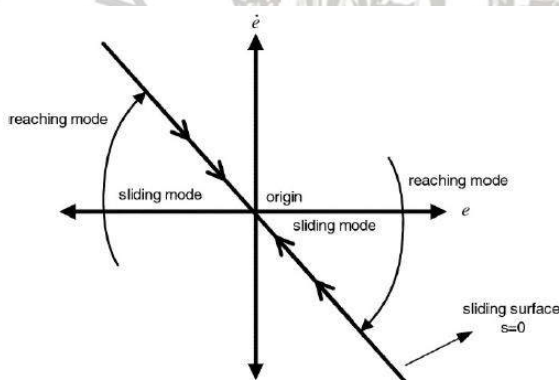
Dengan:

S = *Sliding Surface*

α = Koefisien *Sliding Surface*

x = Fungsi Error dari *Sliding Surface*

Dimana nilai dari α adalah suatu konstanta yang didapatkan dari proses *try and error*, sedangkan x adalah nilai dari *error* pada sistem. Salah satu grafik kemiringan dari persamaan *sliding surface* dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini.



Gambar 2.14 grafik pengendali sliding mode

Sumber: Ucak & Gunel (2019)

Dalam melakukan desain pengendali SMC terdapat dua fase, dua fase tersebut namanya *reaching fase* dan *sliding fase* (Ucak & Gunel, 2019). *Reaching fase* adalah fase dimana sebuah persamaan kontrol membawa keadaan sistem dari kondisi awal ke permukaan geser yang diinginkan. Oleh karena itu *reaching time* pada sistem menuju *sliding surface* tergantung pada keakuratan model sistem dan kemiringan dari *sliding surface*. Dalam *sliding fase* persamaan kontrol berfungsi untuk menahan status sistem *sliding surface* dan memastikan stabilitas dan konvergensi tercapai. SMC terdiri dari bagian kontinu dan diskontinu berdasarkan *reaching fase* dan *sliding fase*. Karena sifat

mekanisme dari *switching* yang diskontinyu maka timbul fenomena yang disebut *chattering*. Dalam prosesnya terdapat suatu lintasan keadaan (state) yang bergerak bolak-balik di sekitaran lintasan *sliding surface* dan terdapat *ripple*, *ripple* inilah yang disebut dengan *chattering*. Akibat adanya *chattering* ini sinyal kontrol menjadi lebih sensitif terhadap gangguan pengukuran dan ketahanan sinyal kontrol menjadi berkurang. Oleh sebab itu pengembangan bentuk *Sliding Mode Control* atau yang disebut sebagai *variabel structure control* terus dikembangkan. Berbagai struktur dari kendali ini sudah banyak dikenalkan seperti integral SMC dan lain-lain. Pemilihan parameter pada SMC sebaiknya mencakup optimalisasi parameter *sliding surface* seperti kemiringan, penguatan, fungsi saklar. Selain itu parameter parameter ini harus adaktif untuk menangani berbagai efek waktu dari sistem, sinyal referensi yang berubah, gangguan, dan lain-lain (Ucak & Gunel, 2019). Berdasarkan kedua fase tersebut maka menurut Kemal Ucak & Gullay Oke Gunel (2019) persamaan umum dari SMC dapat dituliskan sebagai berikut:

$$U = U_{eq} + U_n \dots\dots\dots(2-68)$$

Dengan:

U_{eq} =Pengendali Ekuivalen

U_n =Pengendali Diskontinyu

Persamaan kontrol dari SMC memiliki dua komponen penyusun yaitu sebuah ekuivalen kontrol dan diskontinyu kontrol komponen. Ekuivalen kontrol (U_{eq}) adalah pengendali yang berperan dalam tahapan sliding (sliding fase). Ekuivalen kontrol (U_{eq}) ini dapat dicari dengan mempertimbangkan *Sliding Mode* ideal yang terjadi ketika fungsi dari $s=0$ dan turunan dari fungsi $s =0$. Sedangkan U_n adalah kendali diskontinyu yang digunakan untuk memastikan tidak terjadi penyimpangan pada *sliding surface* pada sistem yang dikendalikan. Terdapat teori kestabilan Lyapunov seperti berikut: (Berhoumi et al, 2016)

$$V = \frac{1}{2} S^2 \dots\dots\dots(2-69)$$

Atau dapat berbentuk sebagai berikut: (Berhoumi et al, 2016)

$$V = S\dot{S} \dots\dots\dots(2-70)$$

Dengan:

$V =$ Fungsi Lyapunov

$\dot{S} =$ Turunan *Sliding Surface*

Dimana dari persamaan ini bahwa kondisi yang memenuhi kondisi dari *Reaching fase* atau komponen pengendali diskontinyu (U_n). Dapat diperoleh dengan cara menentukan $\dot{S}\dot{S}$ lebih kecil dari nol sebagai berikut: (Barhoumi et al, 2016)

$$\dot{S}\dot{S} < 0 \dots\dots\dots(2-71)$$

Namun dalam beberapa penelitian persamaan U_n ditetapkan seperti $-K\text{sign}(s)$. Dimana nilai K adalah suatu konstanta. Sehingga persamaan umum dari pengendali SMC dapat dituliskan sebagai berikut: (Barhoumi et al, 2016)

$$U = U_{eq} - K\text{sign}(s) \dots\dots\dots(2-72)$$

Menurut buku *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical System* karya dari Vadim Utkin. Untuk mengendalikan sistem Elektronika daya seperti konverter, Vadim Utkin mendesain persamaan kontrolnya dengan persamaan sebagai berikut yang dikenal dengan persamaan SMC konvensional sebagai berikut: (Utkin et al, 2009, p.322)

$$U = \frac{1}{2}(1 - \text{sign}(s)) \dots\dots\dots(2-73)$$



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode yang digunakan

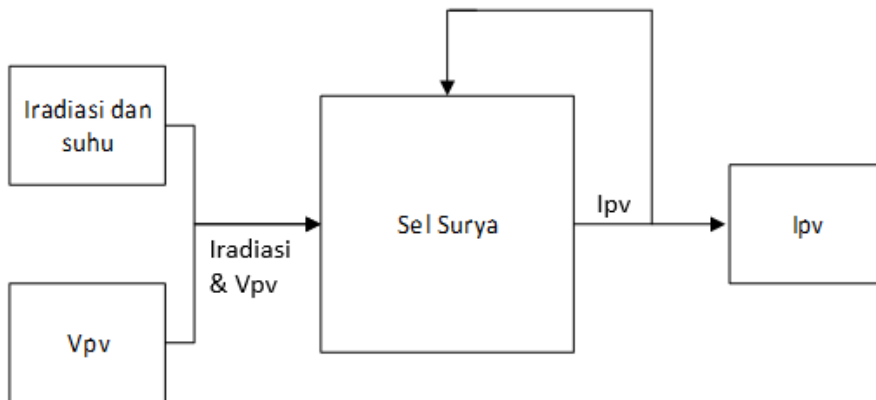
Pada penelitian ini dilakukan penerapan metode SMC pada sistem *Boost Converter* untuk memperkecil osilasi tegangan keluaran *Boost Converter*. Dimana masukan dari *Boost Converter* adalah keluaran dari sel surya yang bervariasi tergantung pada perubahan iradiasi cahaya matahari. Penelitian dilakukan dengan simulasi pada MATLAB Simulink yang disimulasikan pada *open loop* dan *close loop*. Nantinya *settling time* dan selisih tegangan keluaran saat sebelum terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan berupa tegangan masukan yang bervariasi dan beban yang bervariasi akan dianalisis.

Dalam melakukan penelitian terdapat tahap yang perlu dilakukan, yaitu:

1. Menentukan karakteristik panel surya, seperti rating daya, arus hubung singkat, tegangan rangkaian terbuka, koefisien suhu, dan tegangan kerja optimal.
2. Menentukan parameter-parameter komponen *Boost Converter*, seperti tegangan masukan, resistor, induktor, kapasitor, *duty cycle*, tegangan referensi, dan frekuensi *switching*.
3. Memodelkan algoritma MPPT ICM, langkah penelitian yang perlu dilakukan adalah menentukan diagram alir untuk melacak titik daya maksimum sel surya.
4. Memodelkan rangkaian *Boost Converter* dalam bentuk matematis (*State Space*).
5. Untuk *Boost Converter* dengan pengendali *sliding mode*, langkah penelitian yang dilakukan adalah menentukan parameter referensi yang digunakan dan persamaan error atau *sliding surface* sehingga diperoleh persamaan *duty cycle*. Kemudian membuat rangkaian *Boost Converter* menggunakan pengendali *sliding mode* pada simulink MATLAB.
6. Langkah terakhir adalah menganalisa hasil simulasi dan menarik kesimpulan.

3.2 Diagram Alir

3.2.1 Sel Surya



Gambar 3.1 Blok diagram sel surya

Gambar 3.1 menunjukkan diagram blok dari model sel surya yang dirancang. Pada gambar dapat dilihat bahwa terdapat blok utama, yaitu blok model sel surya. Pada blok model sel surya, terdapat persamaan-persamaan karakteristik sel surya sesuai dengan persamaan (2-1) sampai (2-7). Masukan dari blok ini adalah nilai iradiasi, suhu sel surya, tegangan sel surya dan arus sel surya. Iradiasi dan suhu sel surya merupakan 2 parameter kondisi lingkungan yang berpengaruh terhadap besarnya arus sel surya. Tegangan keluaran sel surya dibuat sebagai masukan untuk menjadikan tegangan sel surya sebagai sebuah variabel bebas. Artinya titik kerja sel surya ditentukan berdasarkan nilai tegangan sel surya tersebut. Sementara itu, nilai arus sel surya juga menjadi masukan pada model sel surya ini agar persamaan karakteristik sel surya dapat terpenuhi. Keluaran dari blok model sel surya adalah arus sel surya menghasilkan keluaran IPV, yang menjadi keluaran dari model sel surya secara keseluruhan. Arus sel surya keluaran model ini juga diumpan balik ke blok model sel surya agar dapat memenuhi persamaan karakteristik sel surya.

Pada penelitian ini sel surya yang menjadi acuan adalah sel surya model BP MSX60. Gambar 3.2 menunjukkan beberapa karakteristik dari sel surya BP MSX60.

Electrical Characteristics¹

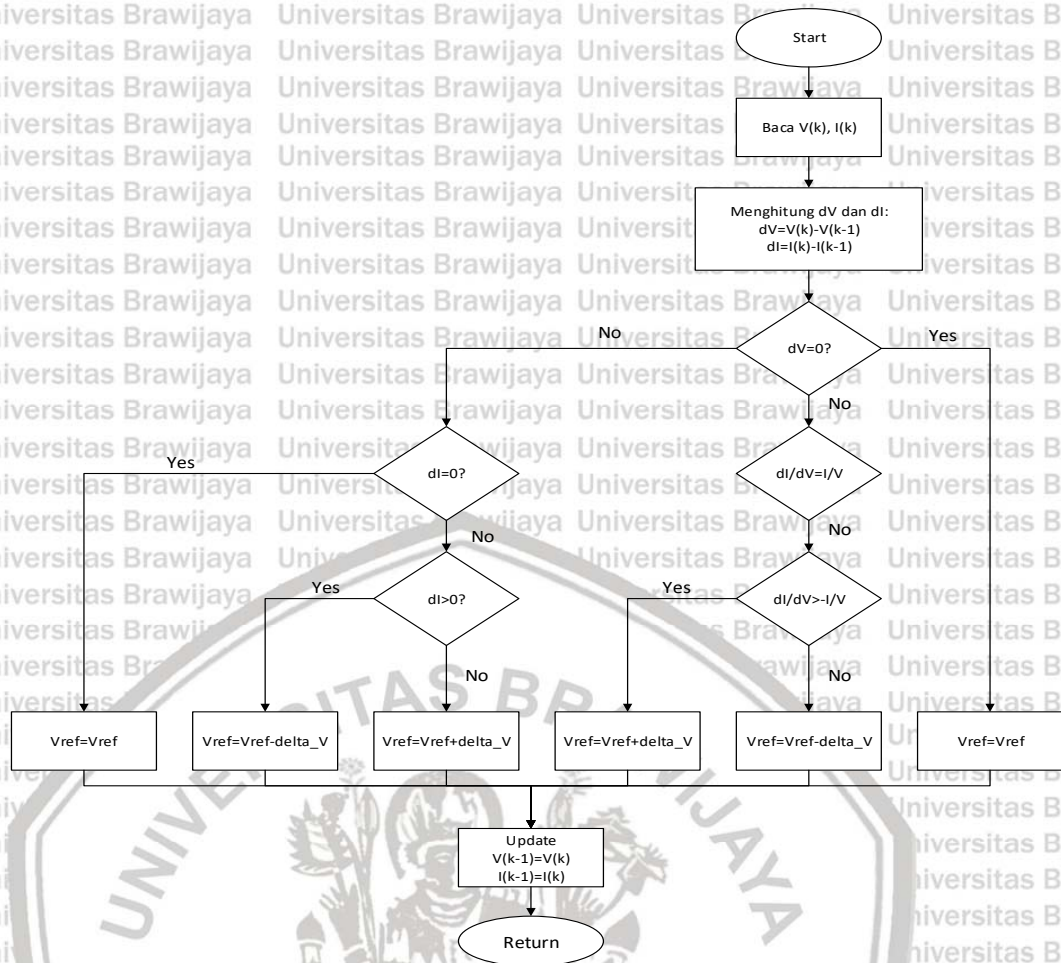
	BP MSX 60	BP MSX 64 ¹
Maximum power (P_{max}) ²	60W	64W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	17.1V	17.5V
Current at P_{max} (I_{mp})	3.5A	3.66A
Minimum P_{max}	58W	62W
Short-circuit current (I_{sc})	3.8A	4.0A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.1V	21.3V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ³	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

Gambar 3.2 Karakteristik sel surya MSX 60

Data ini mewakili kinerja modul MSX 60 dan MSX 64 tipikal yang diukur pada keluarannya terminal, dan tidak termasuk efek dari perlengkapan tambahan seperti dioda atau kabel. Datanya berbasis pada pengukuran yang dilakukan sesuai dengan STC (*Standard Test Conditions*) atau Kondisi Uji Standar, yaitu: iradiasi cahaya matahari 1 kW / m² pada distribusi spektral AM 1.5 (radiasi spektral global ASTM E892), suhu sel 25 ° C.

3.2.2 Diagram alir algoritma ICM

Metode MPPT yang digunakan pada sistem ini adalah *Incremental Conductance Method* (ICM). Prinsip dasar dari metode ini telah dijelaskan pada bab 2. Algoritma ini termasuk jenis MPPT langsung yang memberikan rekomendasi tegangan operasi sel surya berdasarkan nilai tegangan dan arus sel surya. Metode ICM ini merupakan metode pencarian daya maksimal dengan cara menyusuri kurva hingga mencapai titik maksimal kurva. Algoritma dari kedua metode ini sederhana namun memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mencari titik maksimum. Karena kesederhanaannya maka untuk mengimplementasikan algoritma ini membutuhkan biaya yang rendah bila dibandingkan dengan biaya implementasi untuk algoritma-algoritma lain yang lebih kompleks seperti logika *fuzzy* dan *neural network* (Liu and Lopez).



Gambar 3.3 Flowchart algoritma Incremental Conductance Methode

Sumber: Ananduta (2011)

Algoritma ICM memiliki data masukan berupa $V(k)$ dan $I(k)$. Mula-mula algoritma ini menghitung perbedaan tegangan saat ini $V(k)$ dengan tegangan pada sampling sebelumnya $V(k-1)$, yaitu $dV = V(k) - V(k-1)$, dan juga menghitung perbedaan arus saat ini $I(k)$ dengan arus pada sampling sebelumnya $I(k-1)$, yaitu $dI = I(k) - I(k-1)$. Sesuai dengan prinsip dasar algoritma ini dimana daya maksimum terjadi pada saat $dP/dV = 0$ atau $dI/dV = -I/V$, maka kemudian dilihat apakah $dV = 0$ dan apakah $dI = 0$. Jika $dV = 0$ dan $dI = 0$, artinya titik tersebut adalah titik daya maksimum, sehingga V_{ref} tidak mengalami perubahan. Jika dV bernilai 0 sedangkan dI tidak bernilai 0, maka perlu diperhatikan nilai dI tersebut.

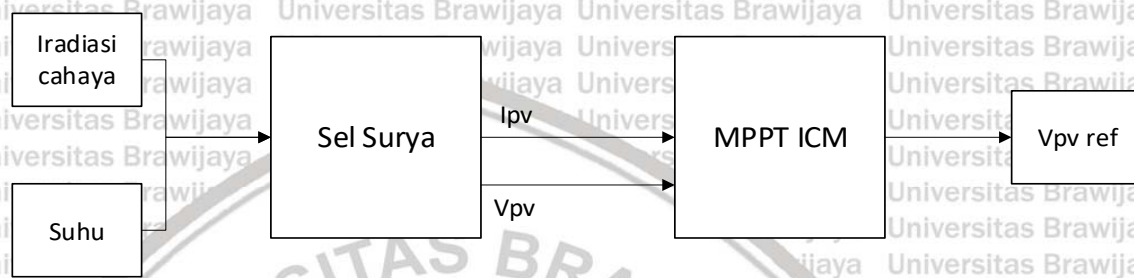
- a) Jika $dV = 0$ dan $dI > 0$, maka $V_{ref} = V_{ref} - \delta_V$.
- b) Sedangkan jika $dV = 0$ dan $dI < 0$, maka $V_{ref} = V_{ref} + \delta_V$.

Ketika dI/dV dan dI/dV tidak bernilai 0, maka persamaan $dI/dV = -I/V$ yang digunakan sebagai kriteria penentu perubahan V_{ref} .

c) Jika $dI/dV = -I/V$ maka V_{ref} konstan karena pada V_{ref} tersebut terjadi daya maksimum.

d) Sedangkan jika $dI/dV > -I/V$, maka $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$ karena titik tersebut berada pada slope positif dari kurva $P(V)$.

Jika $dI/dV < -I/V$, maka $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$ karena titik tersebut berada pada slope negative dari kurva $P(V)$.



Gambar 3.4 Blok diagram sel surya dengan MPPT

Algoritma MPPT berfungsi untuk mencari nilai tegangan sel surya yang optimal. Dengan pengendalian pada tegangan masukan rangkaian *Boost Converter* seperti ini maka sel surya akan dipaksa untuk bekerja pada titik kerja yang optimal. Algoritma yang digunakan sebagai algoritma MPPT adalah algoritma ICM. Agar algoritma ICM mampu menemukan titik kerja optimal, algoritma ini membutuhkan pengukuran nilai tegangan dan arus sel surya sehingga masukan dari blok algoritma ICM ini adalah arus dan tegangan sel surya. Keluaran dari blok ICM adalah tegangan referensi sel surya yang langsung menjadi masukan ke model sel surya sehingga model sel surya akan bekerja pada nilai tegangan referensi yang diberikan oleh blok ICM.

3.2.3 Diagram alir Boost Converter dengan pengendali sliding mode

a. Boost Converter Open Loop

Boost Converter yang digunakan sebagai *plant* sistem dalam penelitian ini berfungsi untuk menaikkan tegangan masukan. Agar nantinya tegangan keluaran *Boost Converter* dapat diatur dengan baik, maka diperlukan parameter-parameter yang tepat. Parameter-parameter tersebut meliputi tegangan masukan, resistor, induktor, kapasitor, *duty cycle*, tegangan referensi, dan frekuensi *switching*.

Berikut adalah langkah-langkah dalam menentukan parameter komponen *Boost Converter*:

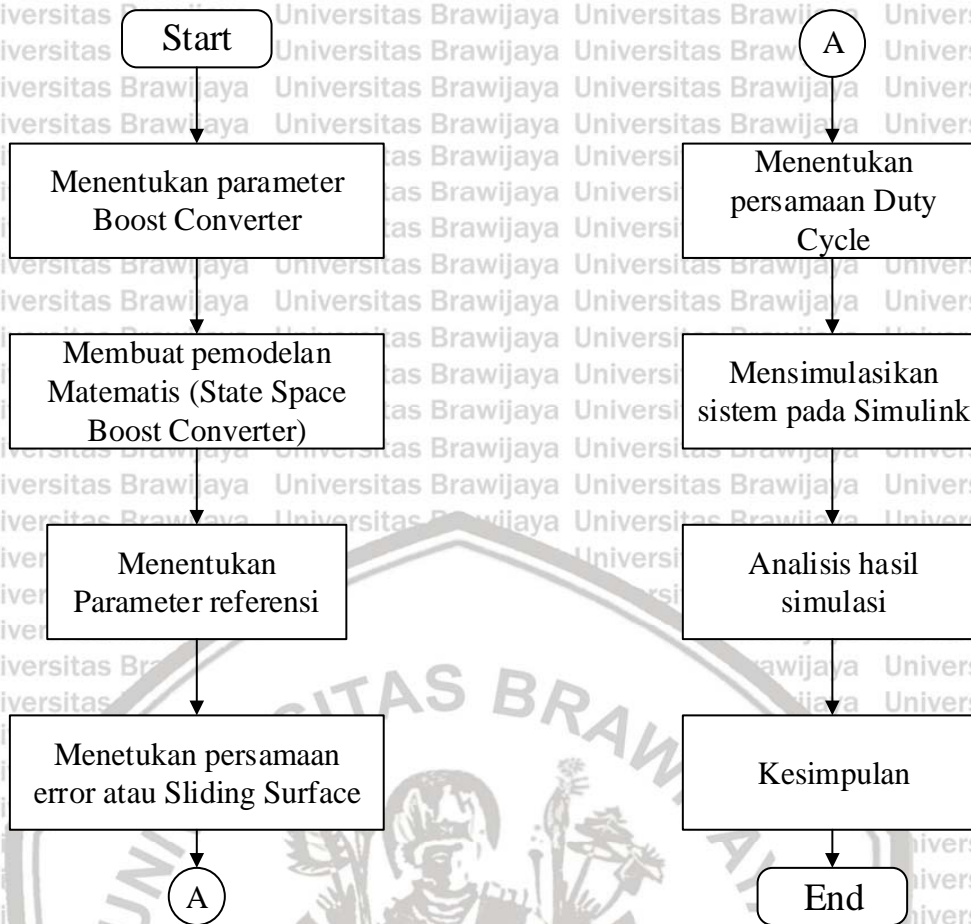
1. Menentukan tegangan masukan dan tegangan referensi. Dalam sistem ini input dari *Boost Converter* berasal dari sel surya.
2. Menentukan *duty cycle* menggunakan persamaan (2-12).
3. Menentukan frekuensi *switching* dari saklar atau komponen semikonduktor yang digunakan pada *Boost Converter*.
4. Menentukan nilai induktor minimal menggunakan persamaan (2-29).
5. Menentukan nilai kapasitor minimal menggunakan persamaan (2-31).

Pemodelan persamaan matematis dari rangkaian *Boost Converter* diperlukan untuk mensimulasikan dan melihat karakteristik dari *Boost Converter* pada Simulink MATLAB. Teknik pemodelan persamaan matematis yang digunakan adalah menggunakan *State Space Averaging* (SSA). Untuk memodelkan rangkaian tersebut, maka hal yang perlu dilakukan yaitu menganalisis rangkaian ketika saklar tertutup menggunakan KVL (*Kirchhoff Voltage Law*) dan KCL (*Kirchhoff Current Law*), sehingga didapatkan persamaan (2-53) dan (2-54)

Model matematis ini akan dimasukkan ke program *Simulink* MATLAB dalam bentuk rangkaian elektrik dari *Boost Converter*. Dari model elektrik ini dapat dilihat hasil simulasi *Boost Converter* dalam keadaan tanpa pengendali (*open loop*). Adapun tujuan dari simulasi ini adalah agar dapat mengetahui bentuk respon *Boost Converter* pada kondisi *open loop*, besar overshoot tegangan keluaran, serta *settling time* dari tegangan keluaran.

b. *Boost Converter Close Loop*

Dalam melakukan penelitian pengaturan tegangan *Boost Converter* dengan menggunakan pengendali *sliding mode* diperlukan langkah-langkah penelitian agar penelitian tersebut dapat berjalan sesuai dengan tujuan. Berikut adalah diagram alir dari penelitian yang dilakukan:



Gambar 3.5 Diagram alir *Boost Converter* menggunakan Sliding Mode

Berdasarkan Gambar 3.5 dapat dilihat diagram alir pembuatan simulasi *Boost Converter* dalam keadaan *closed loop* menggunakan pengendali *sliding mode*. Berikut adalah penjelasan dari diagram alir yang terdapat pada gambar 3.5:

1. Menentukan parameter-parameter komponen dari *Boost Converter*.
2. Membuat pemodelan matematis atau *state space* rangkaian *Boost Converter*.
3. Menentukan persamaan referensi yang akan digunakan. Pada penelitian ini menggunakan tegangan sebagai referensi.
4. Menentukan persamaan *sliding surface* atau *error*. Pada penelitian ini akan memperhatikan satu parameter, yaitu tegangan.
5. Menentukan persamaan *duty cycle*. Parameter *duty cycle* yang ditentukan terlebih dahulu adalah U_{eq} dan nilai U_n , sehingga persamaan akhir dari *duty cycle* diperoleh di persamaan (2-60).
6. Mensimulasikan converter dalam keadaan *close loop* dengan pengendali *sliding mode* menggunakan Simulink MATLAB dengan cara memasukkan model

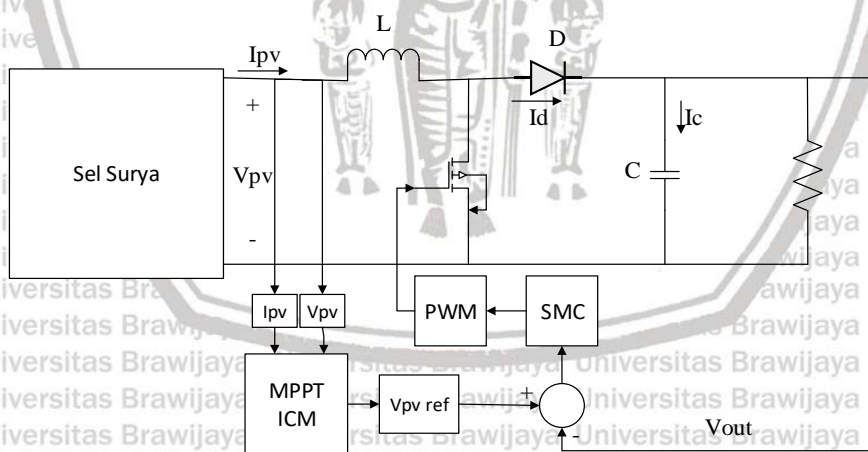
matematis *Boost Converter* ke dalam bentuk blok rangkaian yang ada pada Simulink MATLAB.

7. Menganalisis hasil simulasi yang telah dibuat.
8. Menarik kesimpulan dari hasil analisis tersebut.

Adapun tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui respon tegangan keluaran dari *Boost Converter* dalam keadaan *close loop* menggunakan pengendali *sliding mode*, meliputi *overshoot* dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *steady state* baik ketika sebelum diberi gangguan dan setelah diberi gangguan berupa perubahan tegangan masukan, tegangan referensi, dan beban.

3.3 Perancangan simulasi sistem

Untuk perancangan simulasi sistem yang dilakukan pada penelitian ini *software* yang digunakan dalam perancangan simulasi sistem adalah Simulink MATLAB untuk menganalisis rangkaian konverter daya. Pembuatan dari sistem penelitian yang akan dibuat pada MATLAB terdapat pada Gambar 3.6. Dapat dilihat bahwa gambar tersebut meliputi sel surya dengan pelackan titik daya maksimum menggunakan algoritma ICM yang diimplementasikan pada rangkaian *Boost Converter* dalam keadaan *closed loop* menggunakan pengendali *sliding mode*.



Gambar 3.6 Blok diagram sel surya dengan MPPT yang diimplementasikan pada *Boost Converter* dengan pengendali SMC

Pada Gambar 3.6 dapat dilihat blok diagram untuk sistem MPPT algoritma ICM yang diimplementasikan pada rangkaian *Boost Converter* menggunakan pengendali *sliding mode*. Pada sistem tersebut input dari sel surya adalah iradiasi dan suhu yang nantinya akan menghasilkan output $I(PV)$ dan $V(PV)$. Keluaran dari sel surya akan

menjadi masukan pada rangkaian *Boost Converter* dan MPPT, dimana MPPT akan melacak titik kerja optimal sel surya yang akan menghasilkan keluaran $V(PV)_{ref}$. Keluaran dari *Boost Converter* berupa tegangan keluaran akan menjadi masukan error pada SMC. SMC atau pengendali *sliding mode* memiliki masukan berupa *sliding surface* atau persamaan error dengan referensi yang digunakan adalah referensi tegangan yang dihasilkan oleh MPPT ICM dan tegangan keluaran *Boost Converter*. Untuk keluaran SMC tersebut berupa persamaan *duty cycle* (U) yang terdiri dari persamaan U_n dan U_{eq} . Sinyal keluaran dari pengendali *sliding mode* akan menjadi *duty* yang akan mengatur *gate* pada MOSFET pada sistem *Boost Converter*, sehingga tegangan keluaran pada sistem sel surya *Boost Converter* akan lebih terkendali.

3.4 Pengujian

Untuk menganalisis hasil simulasi, maka pengujian dilakukan pada masing-masing blok maupun keseluruhan sistem. Pengujian *Boost Converter* meliputi :

1. Pengujian ketika tegangan masukan berubah pada waktu tertentu.
2. Pengujian ketika beban berubah pada waktu tertentu.

3.4.1 Pengujian ketika tegangan masukan berubah pada waktu tertentu

Pengujian ini dilakukan dengan mengubah tegangan masukan dari sel surya yang berubah berdasarkan iradiasi cahaya matahari pada *Boost Converter* dalam keadaan beban dan tegangan referensi konstan. Kemudian akan dianalisis *recovery time* dan ΔV . *Recovery time* adalah waktu yang diperlukan tegangan *Boost Converter* untuk kembali setelah kondisi gangguan. Sedangkan ΔV adalah selisih antara tegangan semula keluaran *Boost Converter* sebelum gangguan dengan saat terjadinya gangguan (tegangan *overshoot* gangguan).

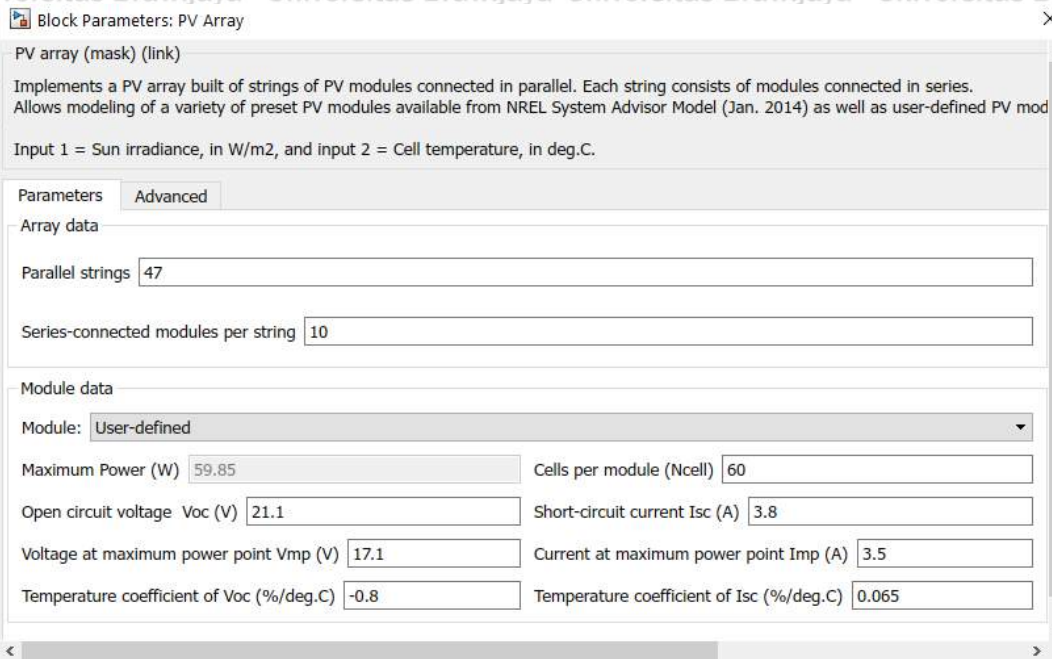
3.4.2 Pengujian ketika beban berubah pada waktu tertentu

Pengujian ini dilakukan dengan mengubah beban R pada *Boost Converter* dalam keadaan tegangan masukan dan tegangan referensi konstan. Kemudian akan dianalisis *recovery time* dan ΔV . *Recovery time* adalah waktu yang diperlukan tegangan *Boost Converter* untuk kembali setelah kondisi gangguan. Sedangkan ΔV adalah selisih antara tegangan semula keluaran *Boost Converter* sebelum gangguan dengan saat terjadinya gangguan (tegangan *overshoot* gangguan).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

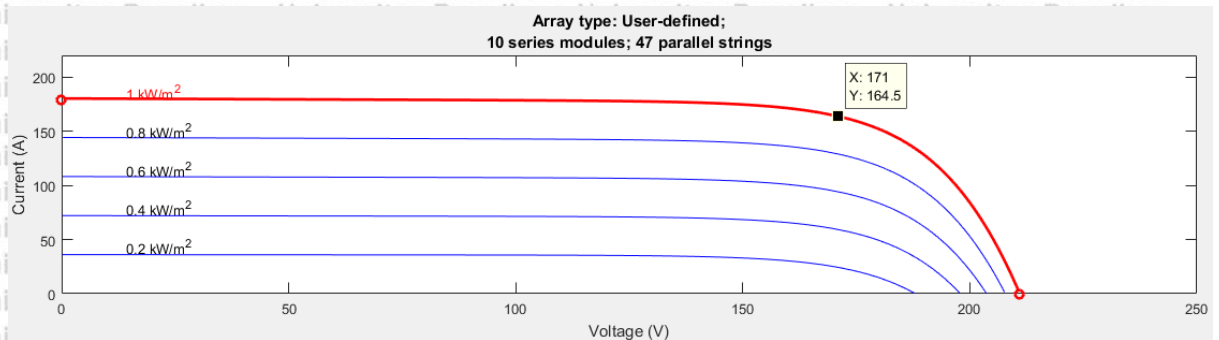
4.1 Spesifikasi Sel Surya

Jenis sel surya yang digunakan pada penelitian ini adalah BP MSX60 yang memiliki karakteristik pada gambar 3.2. Kemudian parameter dari karakteristik sel surya diterapkan pada PV array simulink MATLAB yang dijelaskan pada gambar 4.1.

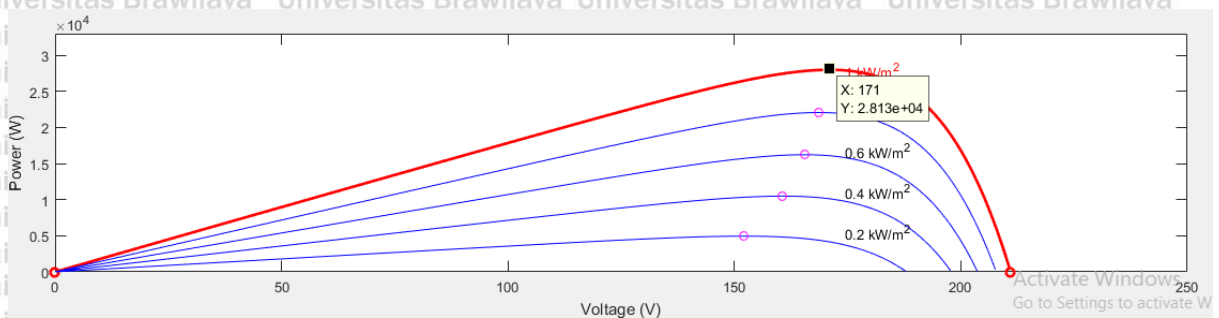


Gambar 4.1 Karakteristik sel surya BP MSX60 pada simulink MATLAB

Modul sel surya pada simulink disusun secara seri sebanyak 10 modul dan diparalel sebanyak 47 modul. Sehingga tegangan yang dihasilkan modul surya yang disusun secara seri adalah 171 Volt dan arus yang dihasilkan disusun secara paralel adalah 164.5 Ampere pada kondisi radiasi 1000 W/m² dan suhu 25 derajat celsius. Grafik IV pada iradiasi 200, 400, 600, 800, 1000 dapat dilihat pada gambar 4.2.



(a)



(b)

Gambar 4.2 (a). Grafik I-V sel surya (b). Grafik P-V sel surya

Pada gambar 4.2 (a) grafik I-V menjelaskan hubungan antara tegangan dan arus sel surya pada keadaan iradiasi bervariasi dimana pada iradiasi 1000 W/m^2 tegangan kerja optimal adalah 171 Volt sedangkan arusnya adalah 164.5 Ampere. Gambar 4.2 (b) grafik P-V menjelaskan hubungan antara daya dan tegangan pada sel surya, pada iradiasi 1000 W/m^2 daya kerja optimalnya adalah 28130 Watt dan tegangan sebesar 171 Volt.

4.2 Spesifikasi komponen *Boost Converter*

Dalam merancang *Boost converter* yang digunakan dalam penelitian ini, perlu dilakukan perhitungan terhadap beberapa komponen sesuai dengan desain *Boost Converter* yang diinginkan. Agar nilai minimal dari induktor, kapasitor dan nilai dari *duty cycle* yang digunakan dapat ditentukan. *Boost converter* yang digunakan memiliki nilai tegangan input dari panel surya yang disusun secara seri sebesar 171 volt dengan tegangan keluaran 240 volt, nilai resistor sebesar 2 Ohm, frekuensi 5 kHz. Dimana nilai tersebut berdasar pada buku yang berjudul *Power Electronics* karya Muhammad H Rashid. Dari nilai yang diinginkan tersebut maka spesifikasi komponen yang digunakan pada *Boost Converter* dipilih sebagai berikut.

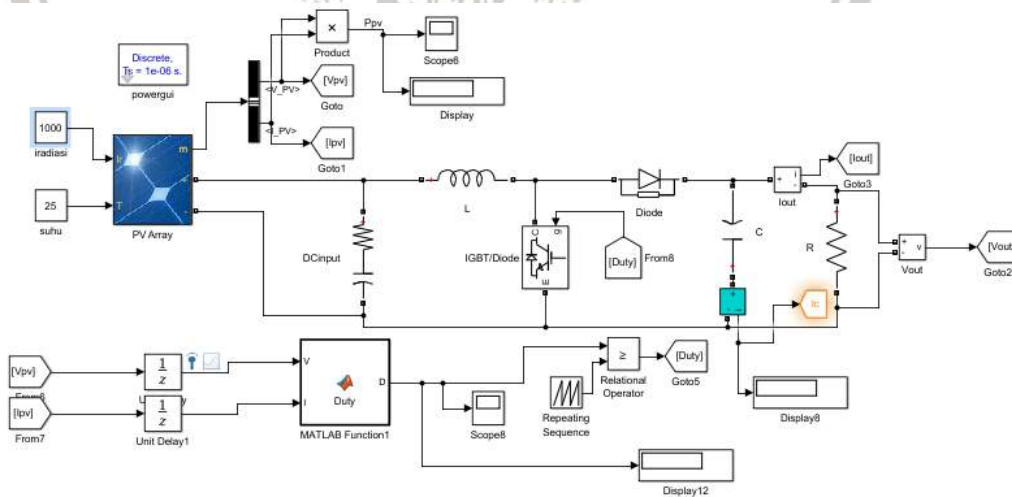
Tabel 4.1 Parameter Komponen Boost Converter

Parameter	Nilai
L	1,45 mH
C	3227uF
Frekuensi	5000 Hz
Vin	70-170 Volt
Vout	240 Volt
Current Ripple (Δi)	5%
Voltage Ripple (ΔV)	1%

Sumber: Muhammad H Rashid

4.3 Desain sistem MPPT Boost Converter Open Loop

Didalam *Boost Converter* terdapat beberapa komponen listrik utama yang menyusun rangkaiannya, diantaranya adalah induktor, kapasitor, saklar elektronik (IGBT), dioda, dan resistor. Nilai dari komponen *Boost Converter* sudah ditentukan pada tabel 4.1. Setelah nilai dari komponen telah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah merancang rangkaian *Boost Converter* dengan Matlab Simulink.



Gambar 4.3 Desain rangkaian sistem MPPT Boost Converter sistem Open Loop

Gambar 4.3 merupakan desain rangkaian sistem MPPT *Boost Converter Open Loop* atau tanpa pengendali dimana MPPT nantinya akan berfungsi sebagai pelacak titik kerja maksimum sel surya agar sel surya mampu bekerja pada titik kerja optimalnya. Kemudian MPPT akan menghasilkan *duty cycle* yang mengatur *gate* pada Mosfet.

4.4 Desain pengendali sistem MPPT *Boost Converter* menggunakan SMC

Langkah pertama yang dilakukan untuk merancang controller *sliding mode* adalah mengembangkan deskripsi dari model rangkaian *Boost Converter* dengan variabel kontrol yang diinginkan yaitu arus dan/atau tegangan atau daya. Pada penelitian ini fokus yang akan dilakukan adalah untuk kontrol tegangan. Dalam kasus konverter *sliding mode* variabel kontrol x dapat dijelaskan pada persamaan (4-1): (Siew-chongtan, 2006)

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} - \beta v_o \\ \frac{d(V_{ref} - \beta v_o)}{dt} \\ \int (V_{ref} - \beta v_o) dt \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4-1)$$

Dimana

x_1 = error tegangan

x_2 = error perubahan tegangan

x_3 = integral error tegangan

V_{ref} = tegangan referensi

v_o = tegangan keluaran

β = rasio umpan balik tegangan

Substitusi model converter pada keadaan CCM pada persamaan (4-1) sehingga didapatkan persamaan (4-2) untuk *Boost Converter* sebagai berikut: (Siew-chongtan, 2006)

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} - \beta v_o \\ \frac{\beta v_o}{r_L C} + \int \frac{\beta(v_o - v_i) \bar{u}}{LC} dt \\ \int x_1 dt \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4-2)$$

Dimana C adalah kapasitansi, L adalah induktansi dan r_L adalah tahanan beban dari *Boost Converter*. Selanjutnya dari persamaan diatas didapatkan persamaan *state space* dari *Boost Converter* sebagai berikut: (Siew-chongtan, 2006)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} - \frac{\beta v_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} \dots \dots \dots (4-3)$$

Setelah didapat persamaan (4-1), langkah selanjutnya adalah menentukan hukum kontrol *sliding mode* yang mengadopsi fungsi dari switching yaitu:

$$u = \begin{cases} 1, & \text{ketika } S > 0 \\ 0, & \text{ketika } S < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (4-4)$$

Dimana S adalah lintasan variabel sesaat atau *sliding surface* yang dijelaskan pada persamaan 2-67. Langkah selanjutnya adalah menentukan turunan dari *sliding surface* pada persamaan 2-71 untuk mengetahui kondisi kontrol *sliding mode* dapat dinyatakan sebagai berikut: (Siew-chongtan, 2006)

$$\dot{S} < 0$$

Substitusi $v_s \rightarrow 0^+ = \bar{u} = 0$ dan matriks *state space* menunjukkan persamaan (4-5) sebagai berikut:

$$-a_1 \frac{\beta ic}{c} + a_2 \frac{\beta ic}{RC^2} + a_3 (V_{ref} - \beta v_o) < 0 \dots\dots\dots (4-5)$$

$$\dot{S} > 0$$

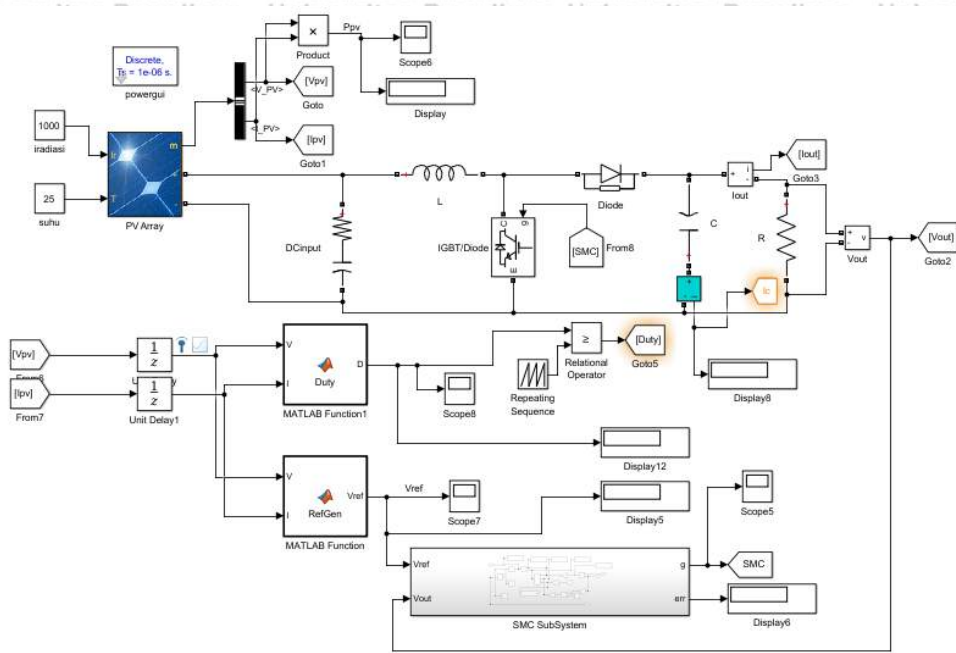
Substitusi $v_s \rightarrow 0^- = \bar{u} = 1$ dan matriks *state space* menunjukkan persamaan (4-6) sebagai berikut:

$$-a_1 \frac{\beta ic}{c} + a_2 \frac{\beta ic}{RC^2} + a_3 (V_{ref} - \beta v_o) - a_2 \frac{\beta v_i}{LC} + a_2 \frac{\beta v_o}{LC} > 0 \dots\dots\dots (4-6)$$

Dari persamaan (4-5) dan (4-6) didapatkan persamaan (4-7)

$$0 < \beta L \left(\frac{a_1}{a_2} - \frac{1}{RC} \right) ic - LC \frac{a_3}{a_2} (V_{ref} - \beta v_o) < \beta (v_o - v_i) \dots\dots\dots (4-7)$$

Persamaan (4-7) merupakan persamaan *Sliding Mode Control* yang di gunakan pada simulasi. Selanjutnya untuk desain simulasi menggunakan *Sliding Mode Control* ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Desain rangkaian sistem MPPT Boost Converter menggunakan kontrol SMC

Gambar 4.4 merupakan rangkaian sistem MPPT Boost Converter dengan pengendali Sliding Mode dimana pada subsistem SMC terdapat rangkaian yang dibentuk dari persamaan (4-5).

4.5 Hasil simulasi V(pv) dan Vout

4.5.1 Hasil simulasi V(pv)

4.5.1.1 Kondisi Vpv sistem *Open Loop* dan SMC ketika Iradiasi bervariasi

Pada penelitian ini iradiasi akan dirubah dari (200, 400, 600, 800, 1000) W/m² dimana beban R dibuat tetap 2 ohm. Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat bagaimana kondisi tegangan sel surya ketika iradiasinya bervariasi. Kondisi dari sel surya dilihat berdasarkan awal menuju *steady state (settling time)*. Perubahan iradiasi akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil uji tegangan sel surya *open loop* ketika iradiasi bervariasi

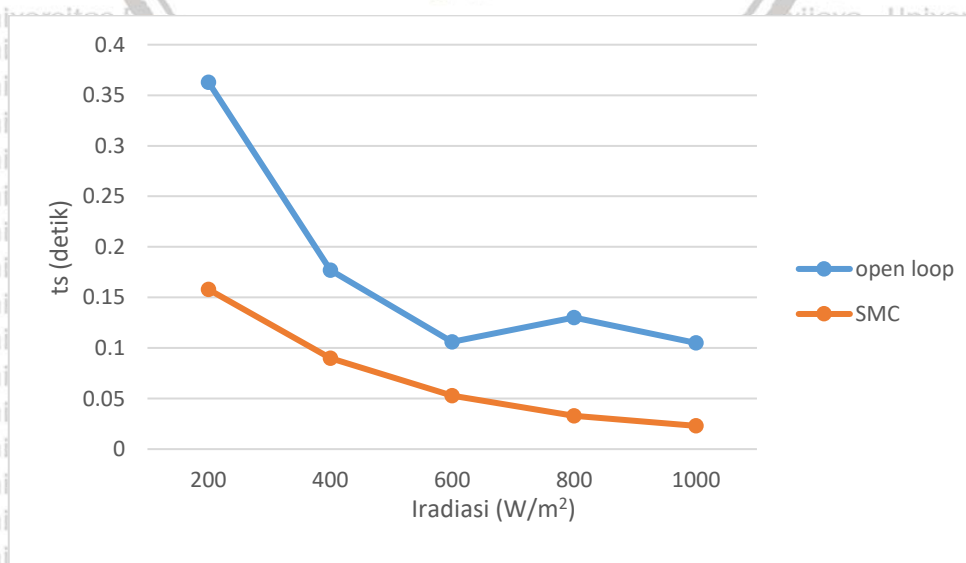
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vpv (Volt)	ts (detik)
1	200	2	71	0,363
2	400		139	0,177
3	600		164	0,106
4	800		166	0,130
5	1000		169	0,105

Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (200, 400 600, 800, 1000) W/m² pada saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari iradiasi yang paling kecil adalah 0,363 detik, 0,177 detik, 0,106 detik, 0,130 detik, dan 0,105 detik atau semakin besar iradiasi waktu yang dibutuhkan maka *steady state* akan semakin cepat. Kemudian hasil untuk tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil uji tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC

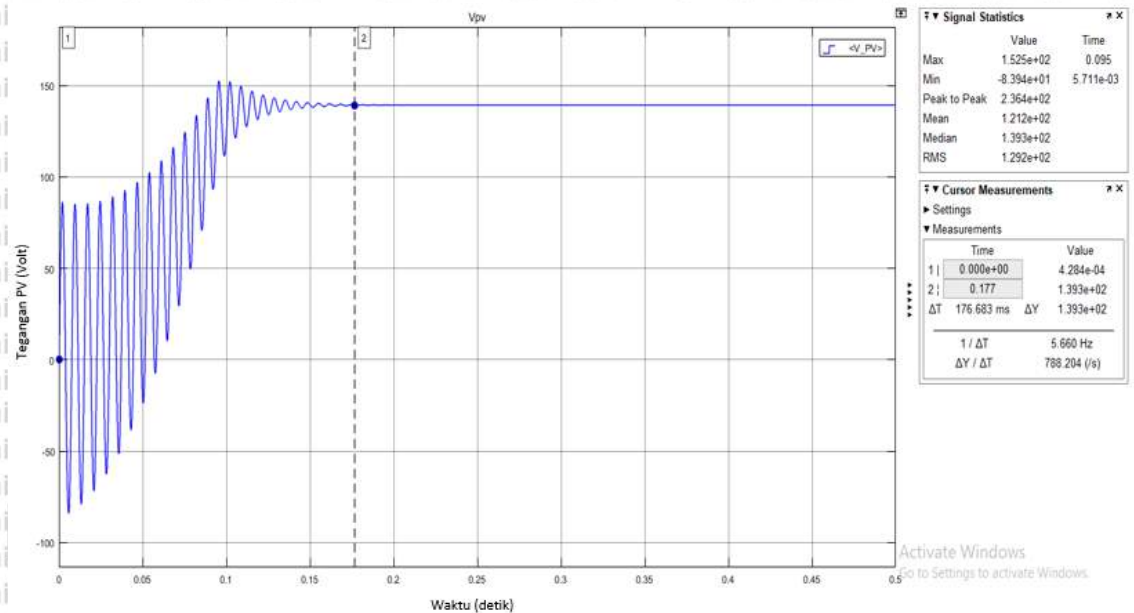
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vpv (Volt)	ts (detik)
1	200	2	72	0,158
2	400		140	0,090
3	600		166	0,053
4	800		170	0,033
5	1000		171	0,023

Pengujian dilakukan dengan cara yang sama yaitu merubah iradiasi (200, 400 600, 800, 1000) W/m² pada saat kondisi boost converter menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari iradiasi yang paling kecil adalah 0,158 detik, 0,090 detik, 0,053 detik, 0,033 detik, dan 0,023 detik atau semakin besar iradiasi waktu yang dibutuhkan maka *steady state* akan semakin cepat. Kemudian perbandingan *settling time* antara kondisi *open loop* dan kondisi menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.5.



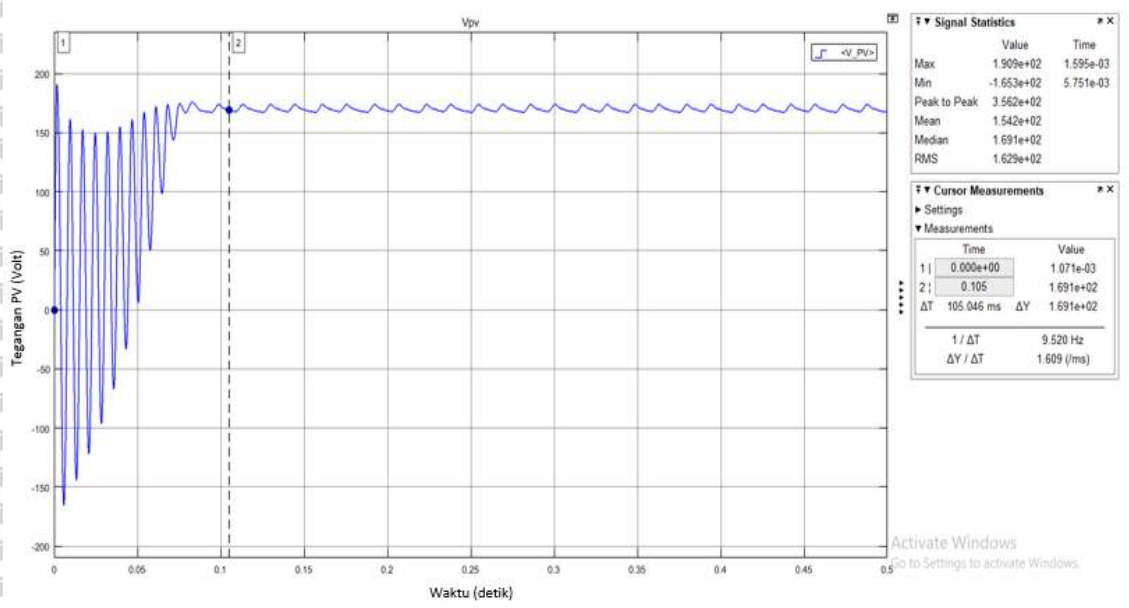
Gambar 4.5 Grafik settling time kondisi open loop dan kondisi SMC

Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan kondisi tegangan sel surya pengendali SMC lebih cepat daripada kondisi tegangan sel surya tanpa pengendali. Kemudian contoh gambar hasil pengujian kondisi open loop iradiasi 400 dan 1000 dapat dilihat pada gambar 4.6 dan gambar 4.7.



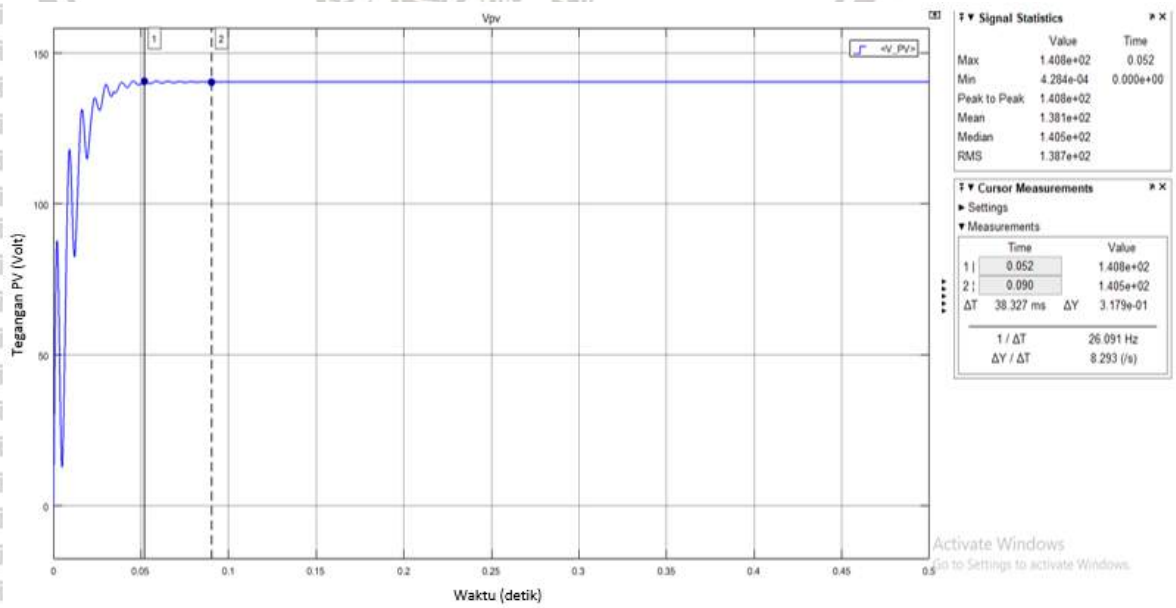
Gambar 4.6 Hasil simulasi V(pv) iradiasi 400 kondisi open loop

Kondisi tegangan sel surya pada saat kondisi open loop iradiasi 400 sebelum menuju settling timenya akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya -83 volt dan nilai maksimumnya 152 volt. Osilasi terjadi selama 0,177 detik menuju steady state dengan nilai 139 volt sesuai dengan tegangan sel surya. Kemudian kondisi pada iradiasi 1000 dapat dilihat pada gambar 4.7.



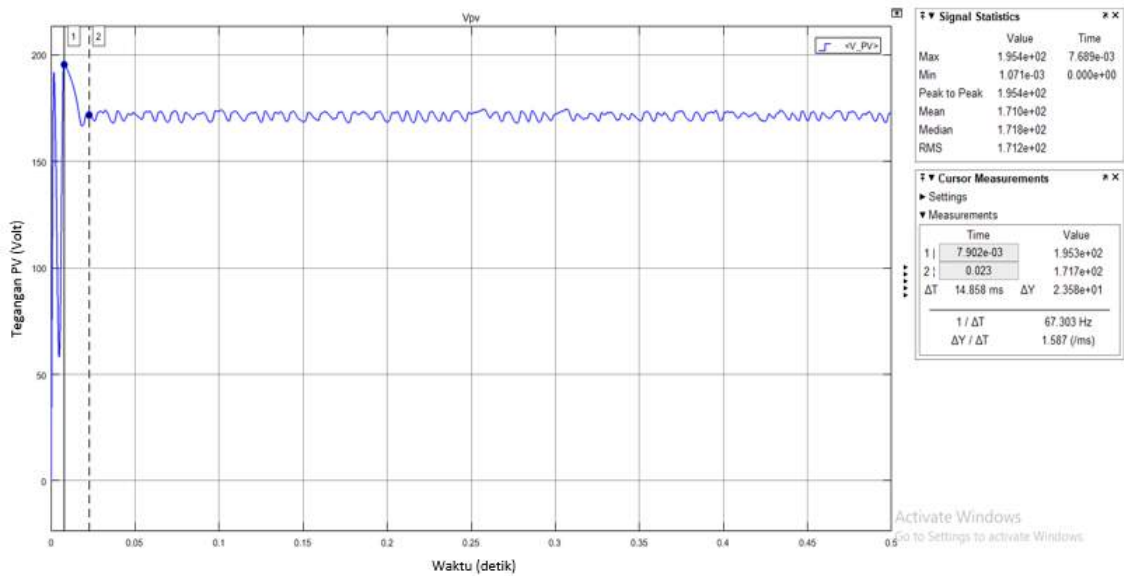
Gambar 4.7 Hasil simulasi V(pv) iradiasi 1000 kondisi open loop

Kondisi tegangan sel surya pada saat kondisi open loop iradiasi 1000 sebelum menuju settling timenya akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya -165 volt dan nilai maksimumnya 190 volt. Osilasi terjadi selama 0,105 detik menuju steady state dengan nilai 169 volt sesuai dengan tegangan sel surya. Kemudian gambar hasil pengujian tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC iradiasi 400 dan 1000 dapat dilihat pada gambar 4.8 dan gambar 4.9.



Gambar 4.8 Hasil simulasi V(pv) radiasi 400 kondisi SMC

Kondisi tegangan sel surya pada saat mengguakan kontrol SMC iradiasi 400 sebelum menuju settling timenya akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya 0 volt dan nilai maksimumnya 140 volt. Osilasi yang terjadi pada saat menggunakan kontrol SMC lebih kecil daripada tanpa kontrol SMC. Dimana kondisi iradiasi 400 membutuhkan waktu menuju *steady statenya* lebih cepat yaitu 0,090 detik dengan nilai *steady state* sebesar 140 volt. Kemudian kondisi pada iradiasi 1000 dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Hasil simulasi V(pv) radiasi 1000 kondisi SMC

Kondisi tegangan sel surya pada saat mengguakan kontrol SMC iradiasi 1000 sebelum menuju *settling time* nya akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya 0 volt dan nilai maksimumnya 195 volt. Osilasi yang terjadi pada saat menggunakan kontrol SMC lebih kecil daripada tanpa kontrol SMC. Dimana kondisi iradiasi 1000 membutuhkan waktu menuju *steady state* nya lebih cepat yaitu 0,023 detik dengan nilai *steady state* sebesar 171 volt.

4.5.1.2 Kondisi V(pv) kondisi *open loop* dan SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu

Pada penelitian ini iradiasi akan dirubah dari (1000, 800, 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,209 detik, 0,41 detik, 0,608 detik, dan 0,812 detik dimana beban R dibuat tetap 2 ohm. Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat bagaimana

kondisi tegangan sel surya ketika iradiasinya bervariasi ketika diubah pada waktu tertentu. Kondisi dari sel surya dilihat berdasarkan awal menuju *steady state* (*settling time*), waktu kembali ketika terjadi lonjakan tegangan menuju nilai referensi (*recovery time*) dan besar selisih dari nilai referensi. Perubahan iradiasi akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil uji tegangan sel surya iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi *open loop*

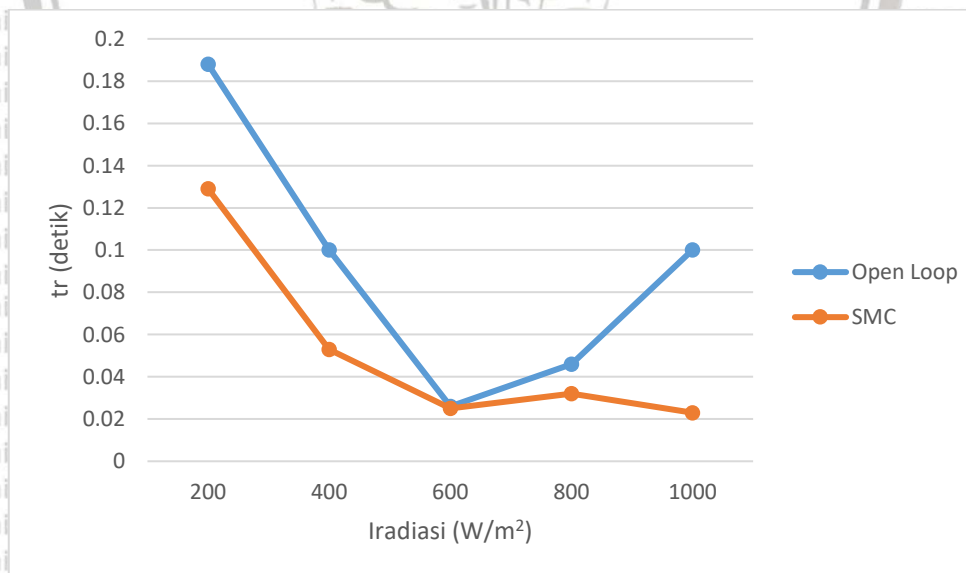
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vpv (Volt)	ts (detik)	tr (detik)	ΔV (Volt)
1	200	2	71	1	0,188	13
2	400		139	0,708	0,100	11
3	600		163	0,436	0,026	25
4	800		167	0,255	0,046	26
5	1000		169	0,100	0,100	21

Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (1000, 800 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,209 detik, 0,41 detik, 0,608 detik, dan 0,812 detik. Saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *recovery time* ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu mempunyai waktu berturut-turut dari iradiasi 1000 menuju iradiasi 200 yaitu 0,100 detik, 0,046 detik, 0,026 detik, 0,100 detik, dan 0,188 detik menuju *steady state* ketika terjadi perubahan iradiasi. Kemudian deviasi tegangan yang dihasilkan tegangan sel surya kondisi *open loop* sebesar 21 Volt, 26 Volt, 25 Volt, 11 Volt, dan 13 Volt ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu. Kemudian pengujian tegangan sel surya ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil uji tegangan sel surya iradiasi berubah pada waktu tertentu menggunakan SMC.

No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	V _{pv} (Volt)	t _s (detik)	t _r (detik)	ΔV (Volt)
1	200	2	72	0,935	0,129	44
2	400		140	0,658	0,053	43
3	600		166	0,429	0,025	53
4	800		170	0,238	0,032	49
5	1000		171	0,023	0,023	24

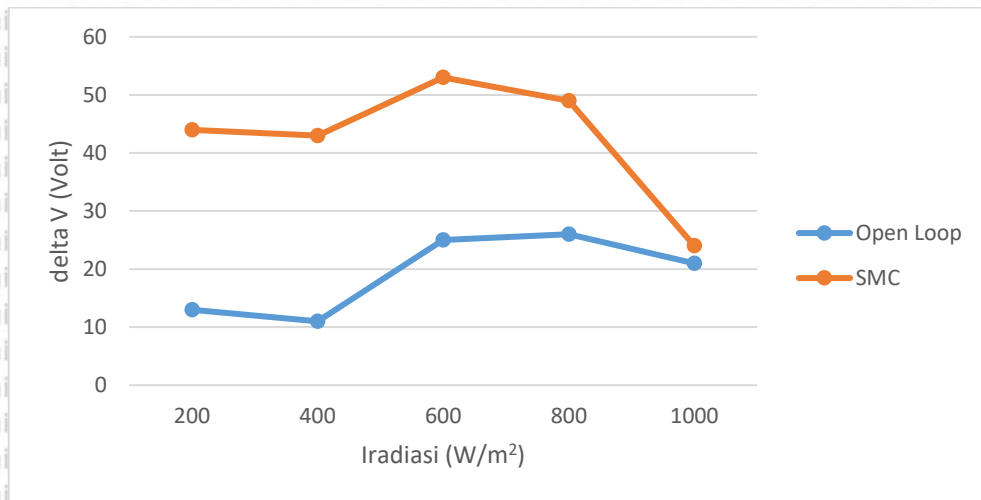
Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (1000, 800 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,206 detik, 0,404 detik, 0,605 detik, dan 0,806 detik. Saat kondisi *Boost Converter* menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *recovery time* ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu mempunyai waktu berturut-turut dari iradiasi 1000 menuju iradiasi 200 yaitu 0,023 detik, 0,032 detik, 0,025 detik, 0,053 detik, dan 0,129 detik menuju *steady state* ketika terjadi perubahan iradiasi. Kemudian deviasi tegangan yang dihasilkan tegangan sel surya kondisi menggunakan kontrol SMC sebesar 24 Volt, 49 Volt, 53 Volt, 43 Volt, dan 44 Volt ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu. Kemudian perbandingan *recovery time* pada kondisi *open loop* dan kondisi menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik *recovery time* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC

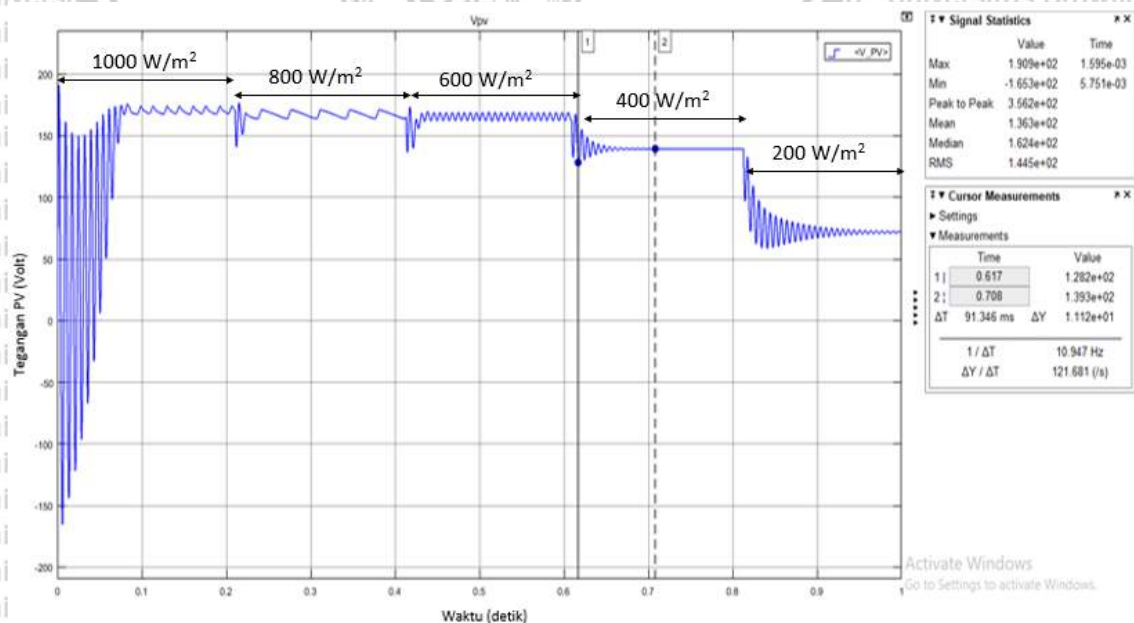
Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa *recovery time* yang dibutuhkan untuk waktu menuju *steady state* setelah perubahan iradiasi pada kondisi kontrol SMC lebih

cepat dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol SMC. Kemudian perbandingan *deviasi* tegangan kondisi *open loop* dan kondisi kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.11.



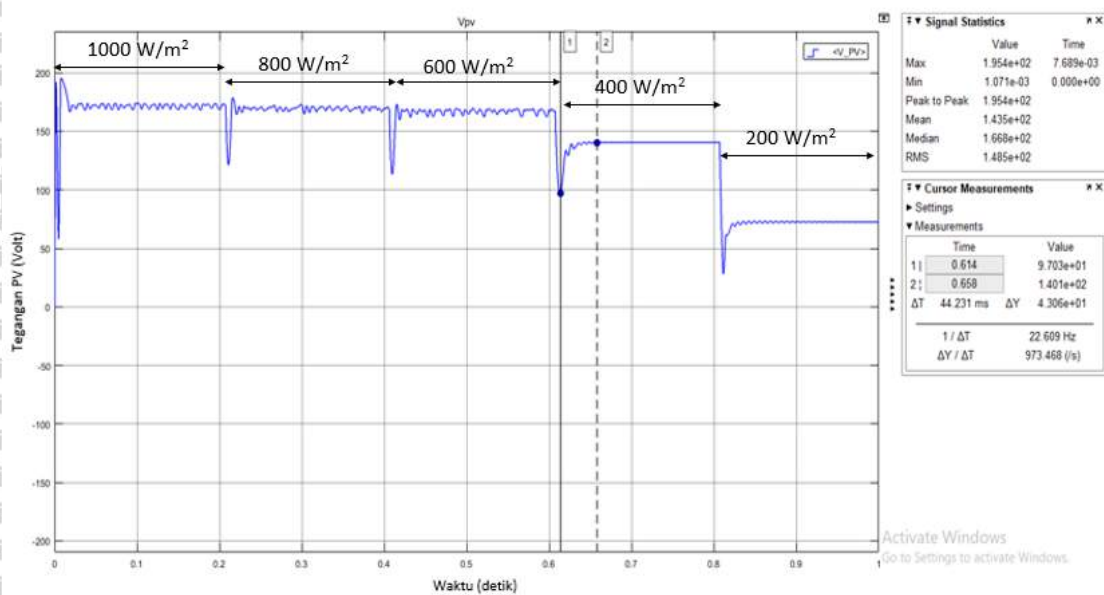
Gambar 4.11 Grafik *deviasi* tegangan sel surya kondisi *open loop* dan menggunakan kontrol SMC

Pada gambar 4.11 dapat dilihat bahwa *deviasi* tegangan pada saat terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu, *deviasi* tegangan pada kondisi kontrol SMC lebih besar daripada kondisi *open loop*. Kemudian gambar hasil pengujian kondisi *open loop* dan kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu dapat dilihat pada gambar 4.12 dan gambar 4.13.



Gambar 4.12 Hasil simulasi $V_{(pv)}$ kondisi *open loop* ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu.

Kondisi $V_{(pv)}$ pada saat kondisi *open loop* ketika terjadi perubahan iradiasi dari 600 ke 400 pada waktu 0,608 dapat dilihat pada gambar 4.12. Gambar 4.12 menunjukkan tegangan sel surya kondisi *open loop* ketika ada perubahan iradiasi dapat dilihat terjadi suatu lonjakan atau deviasi tegangan pada kondisi *open loop*. Kondisi $V_{(pv)}$ *open loop* memiliki lonjakan tegangan sebesar 128 Volt sebelum menuju keadaan *steady state* sebesar 139 Volt sehingga $V_{(pv)}$ memiliki deviasi tegangan sebesar 11 Volt. Untuk *recovery time* pada kondisi *open loop* dapat dilihat pada detik ke 0,608 detik mulai terjadi lonjakan, kondisi *open loop* mampu pulih di detik 0,708 detik. Sehingga memiliki *recovery time* sebesar 0,1 detik. Untuk pengendali SMC dapat dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Hasil simulasi $V_{(pv)}$ kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu.

Kondisi $V_{(pv)}$ pada saat kondisi kontrol SMC ketika terjadi perubahan iradiasi dari 600 ke 400 pada waktu 0,608 detik dapat dilihat pada gambar 4.13. Gambar 4.13 menunjukkan tegangan sel surya kondisi kontrol SMC ketika ada perubahan iradiasi dapat dilihat terjadi suatu lonjakan atau deviasi tegangan pada kondisi kontrol SMC.

Kondisi $V_{(pv)}$ kontrol SMC memiliki lonjakan tegangan sebesar 97 Volt sebelum menuju keadaan *steady state* sebesar 140 Volt sehingga $V_{(pv)}$ memiliki deviasi tegangan sebesar 43 Volt. Untuk *recovery time* pada kondisi kontrol SMC dapat dilihat pada detik ke 0,608

detik mulai terjadi lonjakan, kondisi kontrol SMC mampu pulih di detik 0,658 detik. Sehingga memiliki *recovery time* sebesar 0,053 detik.

4.5.1.3 Kondisi V(pv) sistem *Open Loop* dan SMC ketika R berubah

Pada penelitian ini beban R akan dirubah dari (2, 4, 6, 8, 10) ohm dimana Iradiasi dibuat tetap 1000 W/m². Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat bagaimana kondisi tegangan sel surya ketika beban bervariasi. Kondisi dari sel surya dilihat berdasarkan awal menuju *steady state* (*settling time*). Perubahan beban akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil uji tegangan sel surya beban R bervariasi kondisi *Open Loop*.

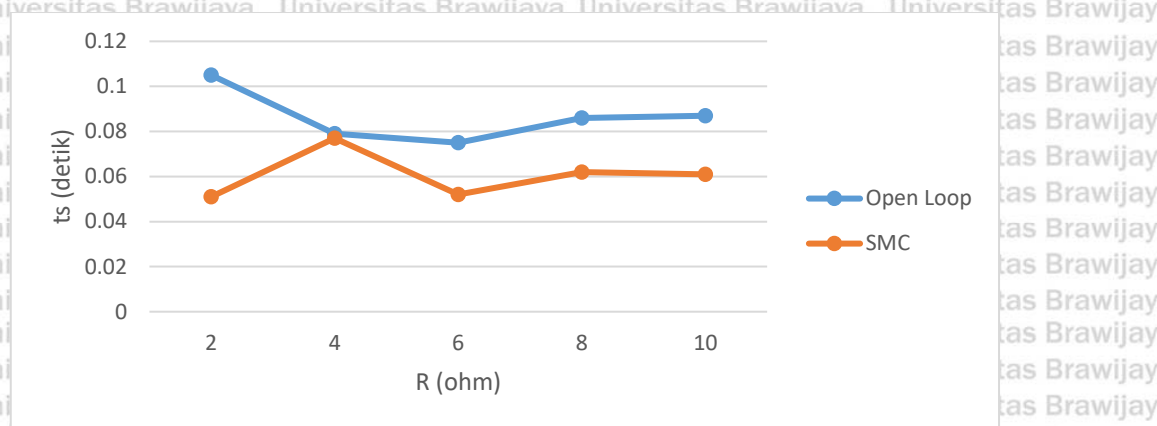
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vpv (Volt)	ts (detik)
1	1000	2	169	0,105
2		4	176	0,079
3		6	179	0,075
4		8	182	0,086
5		10	183	0,087

Pengujian dilakukan dengan merubah R (2, 4, 6, 8, 10) ohm pada saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari beban yang terkecil adalah 0,105 detik, 0,079 detik, 0,075 detik, 0,086 detik, dan 0,087 detik atau semakin besar R maka waktu untuk *steady state* akan semakin lama. Tegangan yang dihasilkan sel surya akan bertambah seiring dengan bertambahnya beban R. Kemudian hasil untuk tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil uji tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC

No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vpv (Volt)	ts (detik)
1	1000	2	171	0,051
2		4	171	0,077
3		6	190	0,052
4		8	197	0,062
5		10	200	0,061

Pengujian dilakukan dengan merubah R (2, 4, 6, 8, 10) ohm pada saat kondisi boost converter menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari beban yang terkecil adalah 0,051 detik, 0,077 detik, 0,052 detik, 0,062 detik, dan 0,061 detik atau semakin besar beban R maka waktu untuk *steady state* akan semakin lama. Kemudian perbandingan *settling time* hasil dari pengujian tegangan sel surya pada kondisi R berubah pada sistem tanpa pengendali dan menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik *settling time* V(pv) kondisi *open loop* dan SMC

Pada gambar 4.14 dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan kondisi tegangan sel surya pengendali SMC lebih cepat daripada kondisi tegangan sel surya tanpa pengendali.

4.5.2 Hasil simulasi Vout

4.6.2.1 Kondisi Vout sistem *Open Loop* dan SMC ketika Iradiasi bervariasi

Pada penelitian ini percobaan yang dilakukan hampir sama dengan percobaan V(pv), iradiasi akan dirubah dari (200, 400, 600, 800, 1000) W/m² dimana beban R dibuat tetap 2 ohm. Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat bagaimana kondisi tegangan keluaran *Boost Converter* ketika iradiasinya bervariasi. Kondisi dari tegangan keluaran dilihat berdasarkan awal menuju *steady state* (*settling time*). Perubahan iradiasi akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter open loop*

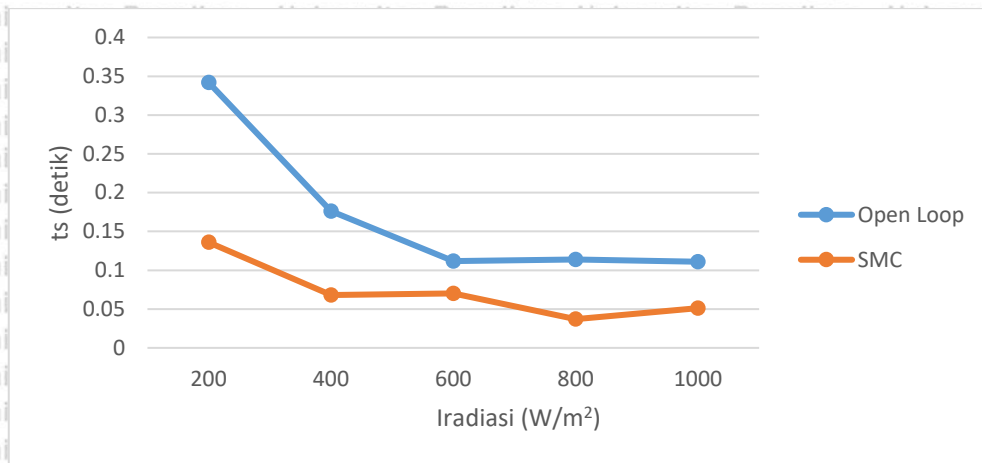
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)
1	200	2	71	0,342
2	400		139	0,176
3	600		179	0,112
4	800		209	0,114
5	1000		236	0,111

Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (200, 400 600, 800, 1000) W/m² pada saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari iradiasi yang paling kecil adalah 0,342 detik, 0,176 detik, 0,112 detik, 0,114 detik, dan 0,111 detik atau semakin besar iradiasi waktu yang dibutuhkan *steady state* akan semakin cepat. Kemudian hasil untuk tegangan keluaran *Boost Converter* menggunakan pengendali SMC dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter menggunakan pengendali SMC

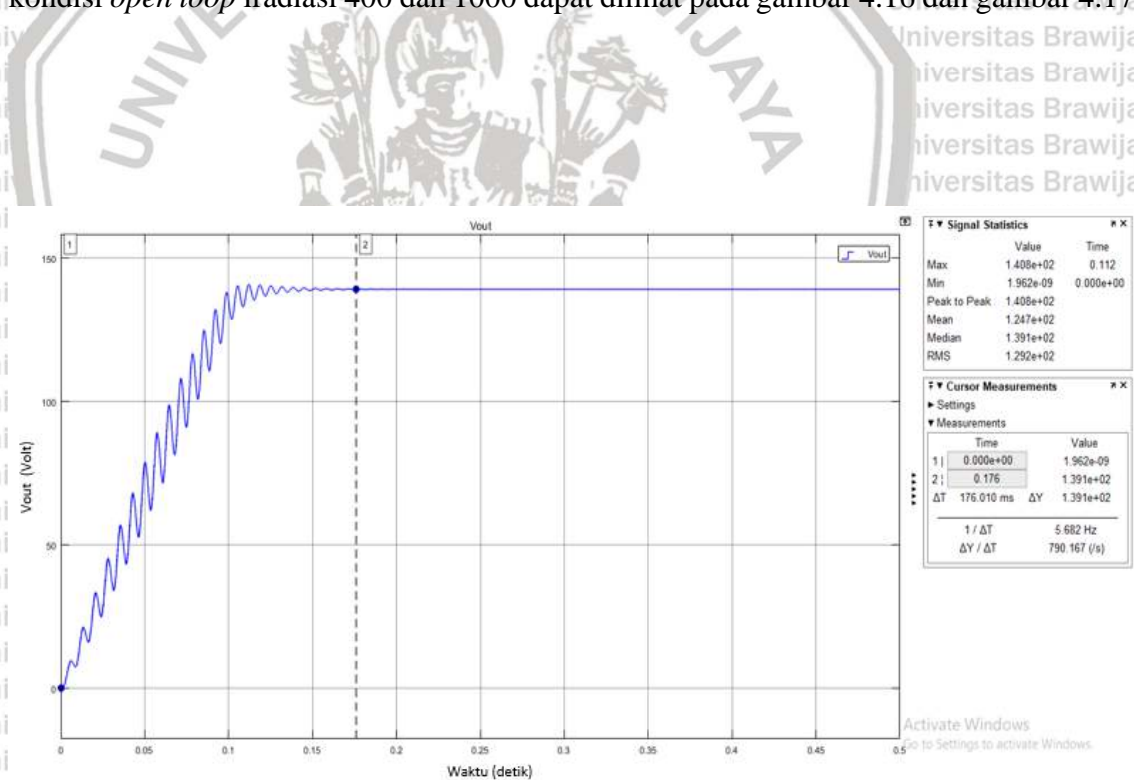
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)
1	200	2	71	0,136
2	400		139	0,068
3	600		179	0,033
4	800		209	0,037
5	1000		236	0,051

Pengujian dilakukan dengan cara yang sama yaitu merubah iradiasi (200, 400 600, 800, 1000) W/m² pada saat kondisi *Boost Converter* menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari iradiasi yang paling kecil adalah 0,136 detik, 0,068 detik, 0,033 detik, 0,037 detik, dan 0,051 detik atau semakin besar iradiasi waktu yang dibutuhkan *steady state* akan semakin cepat. Kemudian perbandingan *settling time* antara kondisi *open loop* dan kondisi menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan settling time Vout kondisi Open Loop dan SMC

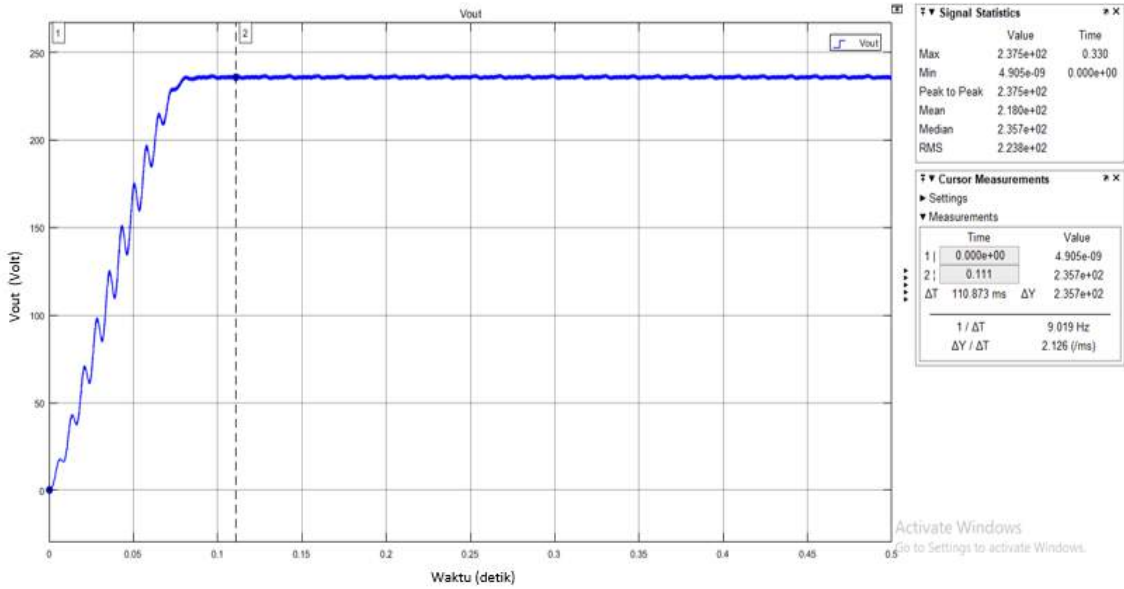
Pada gambar 4.15 dapat dilihat bahwa waktu settling time yang dibutuhkan kondisi tegangan keluaran Boost Converter pengendali SMC lebih cepat daripada kondisi tegangan keluaran Boost Converter tanpa pengendali. Kemudian gambar hasil pengujian kondisi open loop iradiasi 400 dan 1000 dapat dilihat pada gambar 4.16 dan gambar 4.17.



Gambar 4.16 Hasil simulasi Vout radiasi 400 kondisi open loop

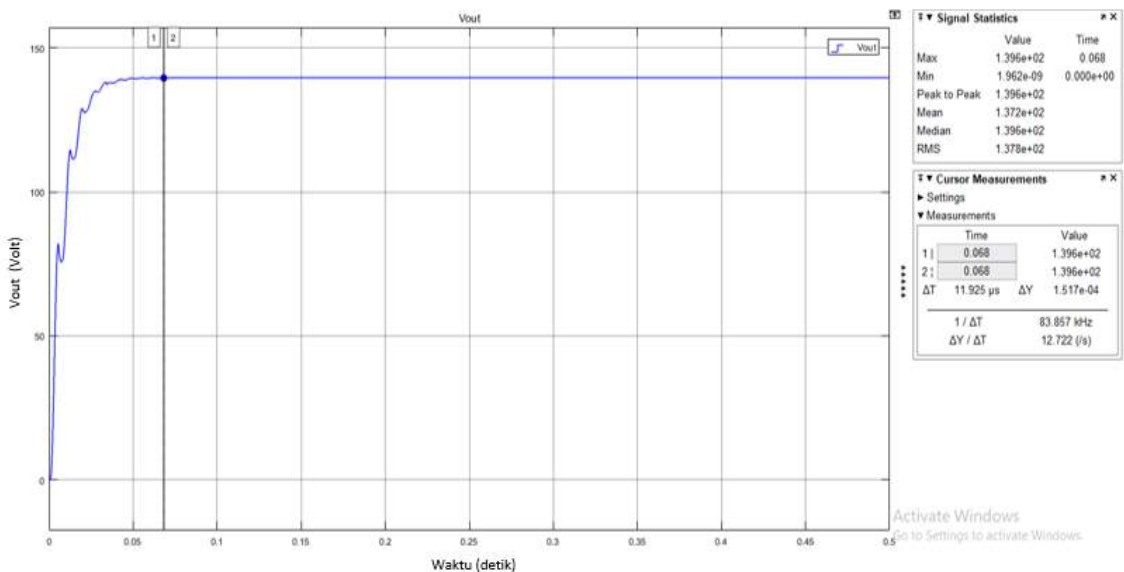
Kondisi tegangan keluaran Boost Converter pada saat kondisi open loop iradiasi 400 sebelum menuju settling timenya akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya sebesar 0 volt dan nilai maksimumnya sebesar 140 volt. Osilasi terjadi selama 0,176 detik

menuju steady state dengan nilai 139 volt. Kemudian kondisi pada iradiasi 1000 dapat dilihat pada gambar 4.17.



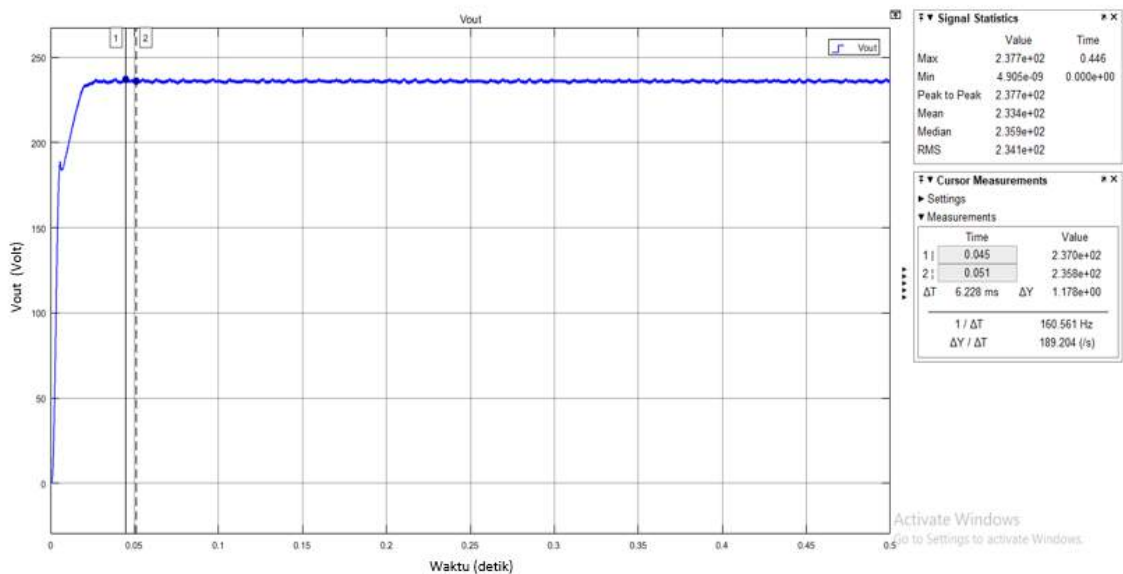
Gambar 4.17 Hasil simulasi Vout radiasi 1000 kondisi *open loop*

Kondisi tegangan keluaran *Boost Converter* pada saat kondisi *open loop* iradiasi 1000 sebelum menuju *settling timenya* akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya 0 volt dan nilai maksimumnya 237 volt. Osilasi terjadi selama 0,111 detik menuju *steady state* dengan nilai 235 volt. Kemudian gambar hasil pengujian tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC iradiasi 400 dan 1000 dapat dilihat pada gambar 4.18 dan gambar 4.19.



Gambar 4.18 Hasil simulasi Vout radiasi 400 kondisi SMC

Kondisi tegangan keluaran *Boost Converter* pada saat menggunakan kontrol SMC iradiasi 400 sebelum menuju *settling timenya* akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya 0 volt dan nilai maksimumnya 139 Volt. Osilasi yang terjadi pada saat menggunakan kontrol SMC lebih kecil daripada tanpa kontrol SMC. Dimana kondisi iradiasi 400 membutuhkan waktu menuju *steady statenya* lebih cepat yaitu 0,068 detik dengan nilai *steady state* sebesar 139 Volt. Kemudian kondisi pada iradiasi 1000 dapat dilihat pada gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil simulasi Vout radiasi 1000 kondisi SMC

Kondisi tegangan keluaran *Boost Converter* pada saat menggunakan kontrol SMC iradiasi 1000 sebelum menuju *settling timenya* akan mengalami osilasi dimana nilai minimumnya 0 volt dan nilai maksimumnya 237 volt. Osilasi yang terjadi pada saat menggunakan kontrol SMC lebih kecil daripada tanpa kontrol SMC. Dimana kondisi iradiasi 1000 membutuhkan waktu menuju *steady statenya* lebih cepat yaitu 0,051 detik dengan nilai *steady state* sebesar 235 volt.

4.6.2.2 Kondisi Vout sistem Open Loop dan SMC ketika Iradiasi berubah pada waktu tertentu.

Pada penelitian ini iradiasi akan dirubah dari (1000, 800, 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,209 detik, 0,410 detik, 0,608 detik, dan 0,812 dimana beban R dibuat tetap 2 ohm. Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat bagaimana

kondisi tegangan sel surya ketika iradiasinya bervariasi ketika diubah pada waktu tertentu. Kondisi dari sel surya dilihat berdasarkan awal menuju *steady state* (*settling time*), waktu kembali ketika terjadi lonjakan tegangan menuju nilai referensi (*recovery time*) dan besar selisih dari nilai referensi. Perubahan iradiasi akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter* iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi *open loop*

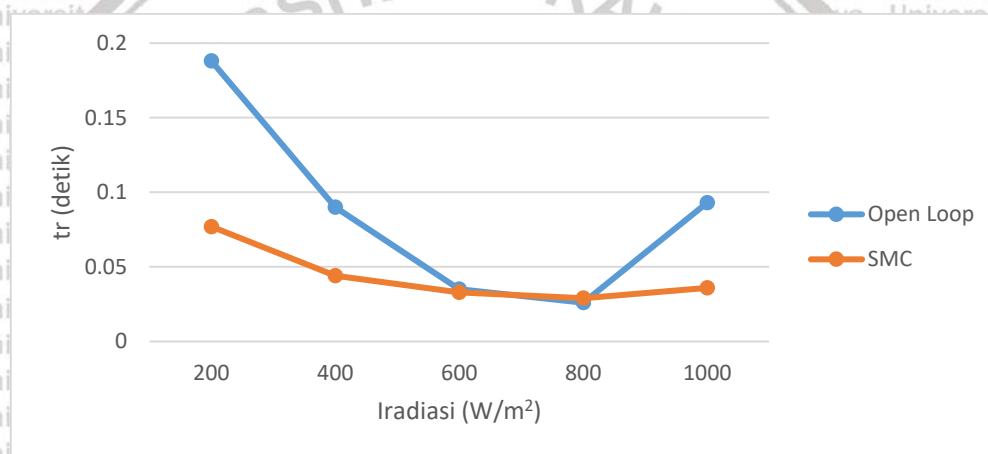
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)	tr (detik)	ΔV (Volt)
1	200	2	71	1	0,188	3
2	400		139	0,698	0,090	1
3	600		179	0,445	0,035	4
4	800		209	0,235	0,026	2
5	1000		236	0,093	0,093	1

Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (1000, 800 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,209 detik, 0,410 detik, 0,608 detik, dan 0,812 detik. Saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *recovery time* ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu mempunyai waktu berturut-turut dari iradiasi 1000 menuju iradiasi 200 yaitu 0,093 detik, 0,026 detik, 0,035 detik, 0,09 detik, dan 0,188 detik menuju *steady state* ketika terjadi perubahan iradiasi. Kemudian *deviasi* tegangan yang dihasilkan tegangan keluaran *Boost Converter* kondisi *open loop* sebesar 3 Volt, 1 Volt, 4 Volt, 2 Volt, dan 1 Volt ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu. Kemudian pengujian tegangan keluaran *Boost Converter* ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil uji tegangan keluaran *Boost Converter* iradiasi berubah pada waktu tertentu kondisi *SMC*

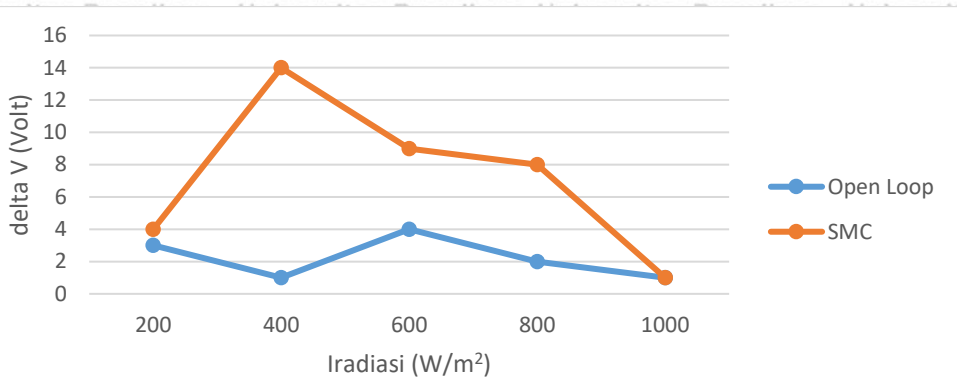
No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)	tr (detik)	ΔV (Volt)
1	200	2	71	0,883	0,077	4
2	400		139	0,649	0,044	14
3	600		179	0,437	0,033	9
4	800		209	0,235	0,029	8
5	1000		236	0,036	0,036	1

Pengujian dilakukan dengan merubah iradiasi (1000, 800 600, 400, 200) W/m² pada waktu 0 detik, 0,206 detik, 0,404 detik, 0,605 detik, dan 0,806 detik. Saat kondisi *Boost Converter* menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *recovery time* ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu mempunyai waktu berturut-turut dari iradiasi 1000 menuju iradiasi 200 yaitu 0,036 detik, 0,029 detik, 0,033 detik, 0,044 detik, dan 0,077 detik menuju *steady state* ketika terjadi perubahan iradiasi. Kemudian *deviasi* tegangan yang dihasilkan tegangan keluaran *Boost Converter* kondisi kontrol SMC sebesar 1 Volt, 8 Volt, 9 Volt, 14 Volt, dan 4 Volt ketika terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu. Kemudian perbandingan *recovery time* pada kondisi *open loop* dan kondisi kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.20.



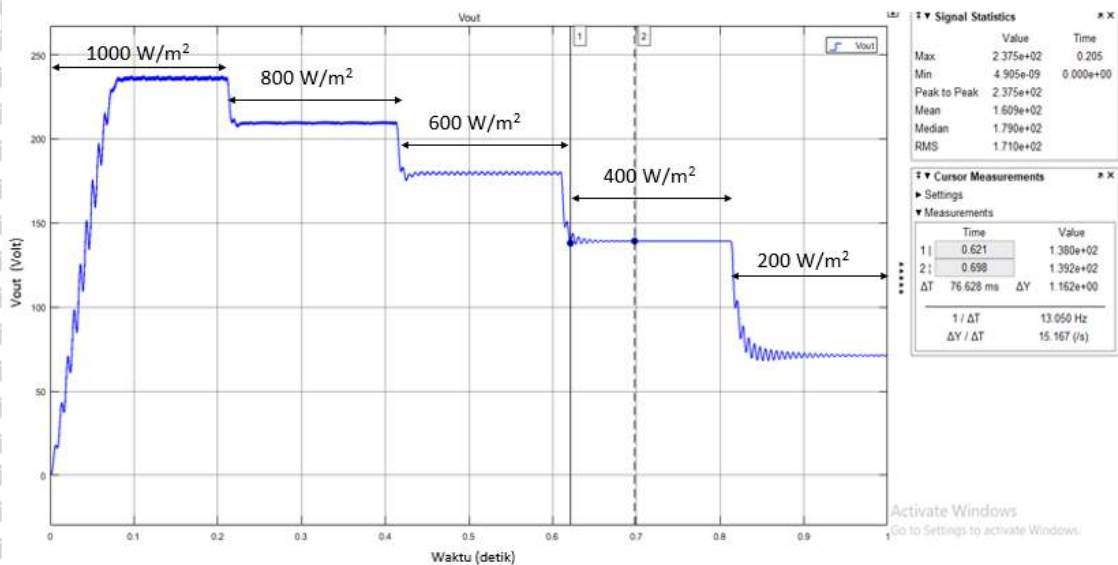
Gambar 4.20 Grafik *recovery time* *Vout* kondisi *Open Loop* dan SMC

Pada gambar 4.20 dapat dilihat bahwa *recovery time* yang dibutuhkan untuk waktu menuju *steady state* setelah perubahan iradiasi pada kondisi kontrol SMC lebih cepat dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol SMC. Kemudian perbandingan *deviasi* tegangan kondisi *open loop* dan kondisi kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.21.



Gambar 4.21 Grafik deviasi tegangan V_{out} kondisi *open loop* dan SMC

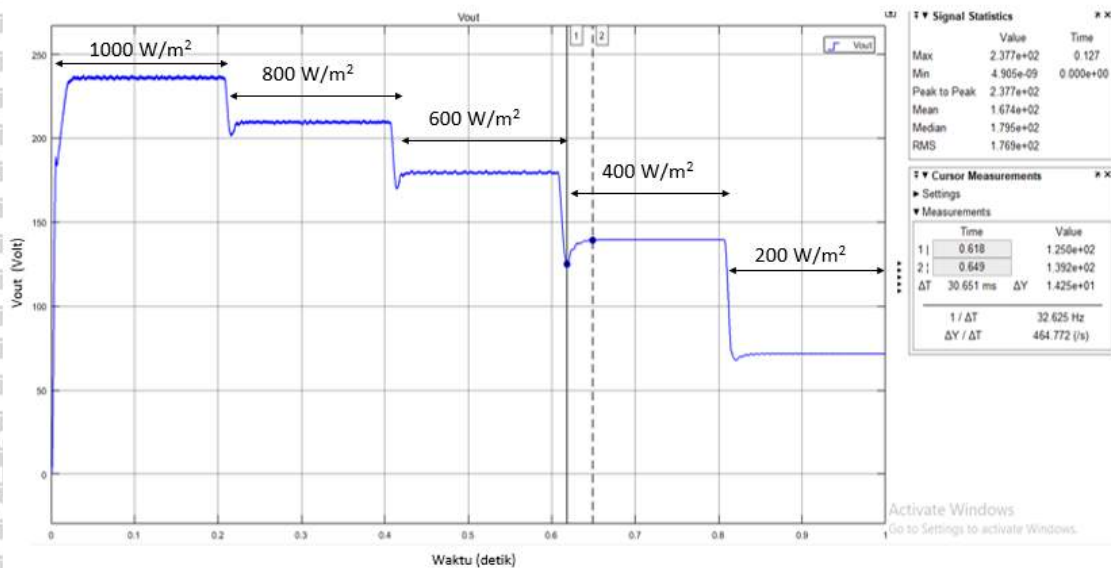
Pada gambar 4.21 dapat dilihat bahwa deviasi tegangan pada saat terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu, deviasi tegangan pada kondisi kontrol SMC lebih besar daripada kondisi *open loop*. Kemudian gambar hasil pengujian kondisi *open loop* dan kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu dapat dilihat pada gambar 4.22 dan gambar 4.23.



Gambar 4.22 Hasil simulasi V_{out} kondisi *open loop* ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu

Kondisi V_{out} pada saat kondisi *open loop* ketika terjadi perubahan iradiasi dari 600 ke 400 pada waktu 0,608 detik dapat dilihat pada gambar 4.22. Gambar 4.22 menunjukkan tegangan keluaran *Boost Converter* kondisi *open loop* ketika ada perubahan iradiasi dapat dilihat terjadi suatu lonjakan atau deviasi tegangan pada kondisi *open loop*. Kondisi V_{out} *open loop* memiliki lonjakan tegangan sebesar 138 Volt sebelum menuju

keadaan steady state sebesar 139 Volt sehingga V_{out} memiliki deviasi tegangan sebesar 1 Volt. Untuk *recovery time* pada kondisi *open loop* dapat dilihat pada detik ke 0,608 detik mulai terjadi lonjakan, kondisi *open loop* mampu pulih di detik 0,698 detik. Sehingga memiliki *recovery time* sebesar 0,09 detik. Untuk pengendali SMC dapat dilihat pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Hasil simulasi V_{out} kondisi kontrol SMC ketika iradiasi berubah pada waktu tertentu

Kondisi V_{out} pada saat kondisi kontrol SMC ketika terjadi perubahan iradiasi dari 600 ke 400 pada waktu 0,608 dapat dilihat pada gambar 4.23. Gambar 4.23 menunjukkan tegangan keluaran *Boost Converter* kondisi kontrol SMC ketika ada perubahan iradiasi dapat dilihat terjadi suatu lonjakan atau deviasi tegangan pada kondisi kontrol SMC. Kondisi V_{out} kontrol SMC memiliki lonjakan tegangan sebesar 125 Volt sebelum menuju keadaan *steady state* sebesar 139 Volt sehingga V_{out} memiliki deviasi tegangan sebesar 14 Volt. Untuk *recovery time* pada kondisi kontrol SMC dapat dilihat pada detik ke 0,608 detik mulai terjadi lonjakan, kondisi kontrol SMC mampu pulih di detik 0,649 detik. Sehingga memiliki *recovery time* sebesar 0,044 detik.

4.6.2.3 Kondisi V_{out} sistem Open Loop dan SMC ketika R berubah

Pada penelitian ini beban R akan dirubah dari (2, 4, 6, 8, 10) ohm dimana Iradiasi dibuat tetap 1000 W/m^2 . Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk melihat

bagaimana kondisi tegangan keluaran *Boost Converter* ketika beban bervariasi. Kondisi dari tegangan keluaran dilihat berdasarkan awal menuju *steady state* (*settling time*).

Perubahan beban akan dilakukan pada *Boost Converter* kondisi *open loop* dan menggunakan SMC. Hasil pengujian dari *open loop* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter R berubah kondisi *open loop*

No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)
1	1000	2	235	0,111
2		4	332	0,102
3		6	403	0,097
4		8	461	0,098
5		10	514	0,131

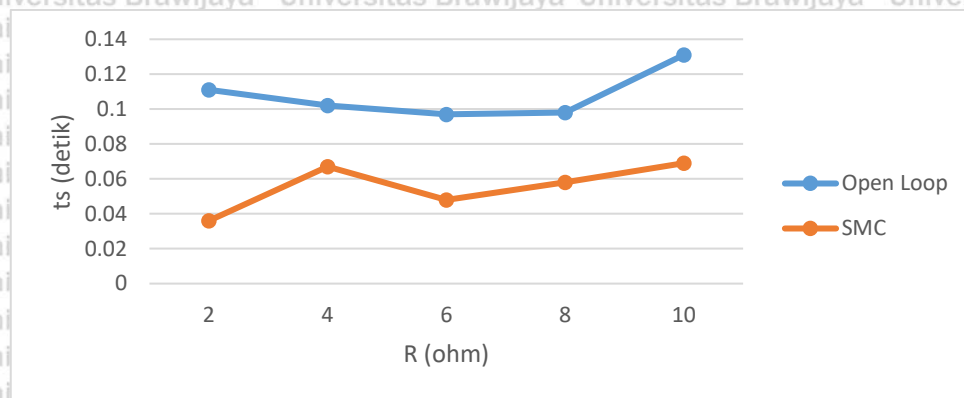
Pengujian dilakukan dengan merubah R (2, 4, 6, 8, 10) ohm pada saat kondisi *Boost Converter open loop* dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari beban yang terkecil adalah 0,111 detik, 0,102 detik, 0,097 detik, 0,098 detik, dan 0,131 detik atau semakin besar beban R maka waktu untuk *steady state* akan semakin lama. Tegangan yang dihasilkan tegangan keluaran *Boost Converter* akan bertambah seiring dengan bertambahnya beban R. Kemudian hasil untuk tegangan sel surya menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil uji tegangan keluaran Boost Converter R berubah menggunakan kontrol SMC

No	Iradiasi (W/m ²)	R (ohm)	Vout (Volt)	ts (detik)
1	1000	2	236	0,036
2		4	333	0,067
3		6	379	0,048
4		8	393	0,058
5		10	400	0,069

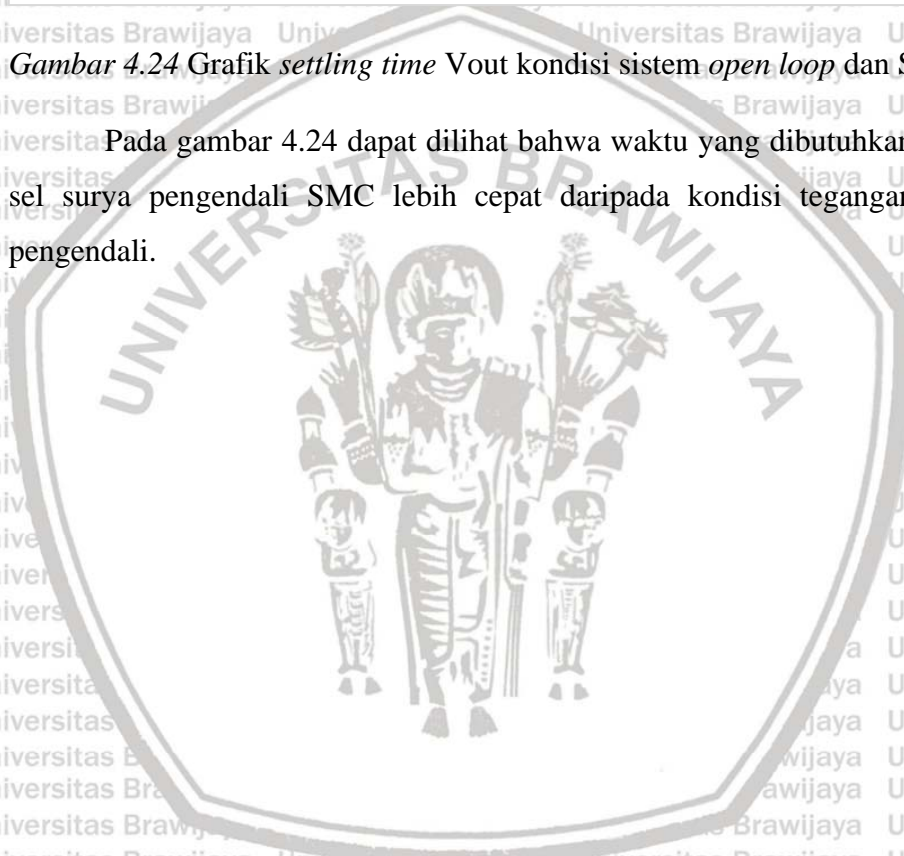
Pengujian dilakukan dengan merubah R (2, 4, 6, 8, 10) ohm pada saat kondisi *boost converter* menggunakan kontrol SMC dapat dilihat bahwa waktu *settling time* untuk menuju *steady state* dari beban yang terkecil adalah 0,036 detik, 0,067 detik, 0,048 detik, 0,058 detik, dan 0,069 detik atau semakin besar beban R maka waktu untuk *steady state* akan semakin lama. Kemudian perbandingan *settling time* hasil dari pengujian tegangan

keluaran *Boost Converter* pada kondisi R berubah pada sistem tanpa pengendali dan menggunakan kontrol SMC dapat dilihat pada gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik settling time V_{out} kondisi sistem *open loop* dan SMC R berubah

Pada gambar 4.24 dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan kondisi tegangan sel surya pengendali SMC lebih cepat daripada kondisi tegangan sel surya tanpa pengendali.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa pada penelitian ini, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah

1. Dalam menentukan persamaan SMC, sliding surface tegangan nantinya akan diturunkan, dengan hasil turunannya sama dengan nol yang kemudian dijumlahkan dengan hasil kali turunan sliding surface dengan sliding surface itu sendiri yang hasilnya harus lebih kecil dari nol.
2. Pengendali SMC berperan untuk memperhalus (memperkecil osilasi) keluaran menuju steady state, yaitu pengendali SMC dapat mempercepat settling time tegangan keluaran dari nilai settling time ketika loop terbuka. Pada saat terjadi perubahan iradiasi pada waktu tertentu yang menyebabkan terjadinya lonjakan tegangan, pengendali SMC dapat memperbaiki tegangan recovery time lebih cepat dari recovery time ketika loop terbuka. Ketika beban R bervariasi tegangan yang dihasilkan sel surya dan tegangan keluaran boost converter semakin besar seiring dengan bertambahnya beban R dan settling time ketika beban R berubah, pengendali SMC mempunyai settling time yang lebih cepat dari settling time ketika loop terbuka.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai penggabungan pengendali MPPT seperti logika fuzzy dan neural network.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan persamaan sliding surface yang lain dengan plant tetap sama yaitu Boost Converter.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai settling time pada osilasi terjadi pada waktu tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

Barhoumi, dkk. (2016). Sliding mode control for a Boost Converter with constant power load. In 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT) (pp. 1-5). IEEE.

Fathabadi. (2016). Novel fast dynamic MPPT (maximum power point tracking) technique with the capability of very high accurate power tracking. Energy, 94, 466-475.

Hart, DW. (2011). Power Electronics. New York : McGraw-Hill.

Hartmann, dkk. (2013). Combining Model-Based and Heuristic Techniques for Fast Tracking the Maximum-Power Point of Photovoltaic Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 28(6), 2875-2885.

Hermansyah. (2015). Simulasi Double Buck Boost Converter DC-DC Bidirectional Menggunakan PID Controller. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh November.

Liu, & Lopes. (2004). An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.

Mahmoud, dkk. (2016). An Enhanced MPPT Method Combining Model-Based and Heuristic Techniques. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7(2), 576-585.

Mohammed S. (2014). Simulation and Analysis of Stand-alone Photovoltaic System with Boost Converter using MATLAB/Simulink. College of Engineering, Dhofar University : IEEE

Rashid M H. (1999). Power Electronics Circuit Device and Applications. New Jersey : Prentice Hall

Rombandi, & Imam. (2009). Modern Power System Control. Yogyakarta: Penerbit Andi.

Salamero, dkk. (2010). Why is Sliding Mode Control Methodology Needed for Power Converters. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference.

Sutedjo, dkk. (2016). Rancang Bangun Modul DC-DC Converter Dengan Pengendali PI. Skripsi. Surabaya : Politeknik Elektronika Negri Surabaya.

Suwitno, dkk. (2017). Perancangan Konverter DC ke DC untuk Menstabilkan Tegangan Keluaran Panel Solar Cell Menggunakan Teknologi Boost Converter. Journal of Electrical Technology.2(3):61-66.

Tan, R H & Hoo, L Y. (2015). DC-DC converter modeling and simulation using state space approach. In 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON) (pp. 42-47). IEEE.

Taufik, dkk. (2017). Analisis Kinerja Flyback Current-Fed Push-Pull DC-DC Converter pada Mode Buck. Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri 2017. Malang: ITN.

Teodorescu, M & Stanciu, D. (2015, May). Sliding coefficients estimation for fixed frequency sliding mode control of Boost Converter. In 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (pp. 698-703). IEEE.

Tsai, HL, dkk. (2008). Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. WCECS.

Uçak, K, & Günel, G Ö. (2020). An adaptive sliding mode controller based on online support vector regression for nonlinear systems. *Soft Computing*, 24(6), 4623-4643.

Utkin, V, dkk. (2009). *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*. London : CRC press

Wibawa U. (2017). *Pendekatan Praktis Pembangkit Energi Baru Terbarukan*. Malang: UB Press

Yan, Z, dkk. (2008). Study on Realizing MPPT by Improved Incremental Conductance Method with Variable Step-size. IEEE .

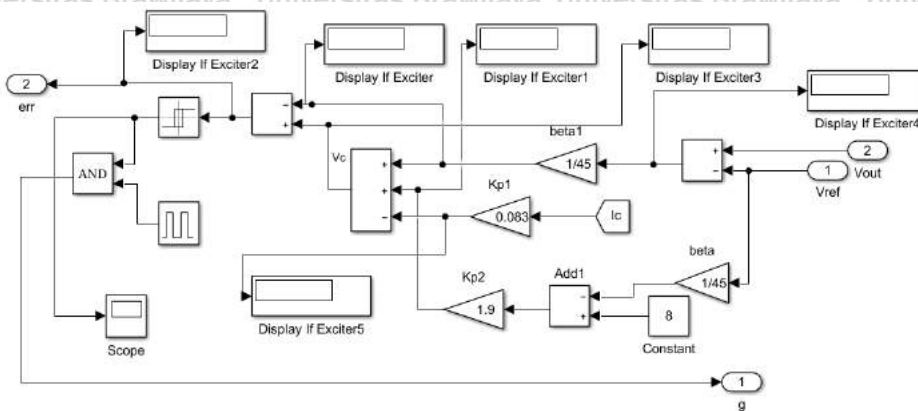
Yi, K & Lu fa, Y. (2009). The Perturbation and Observation's method based on the P-V rate of curve. IEEE .



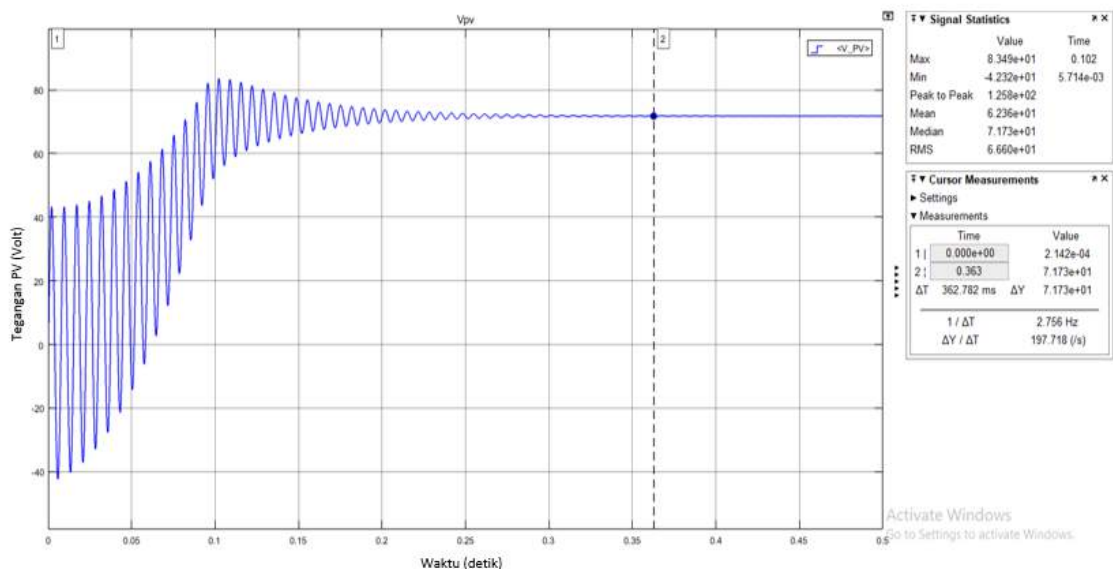
LAMPIRAN



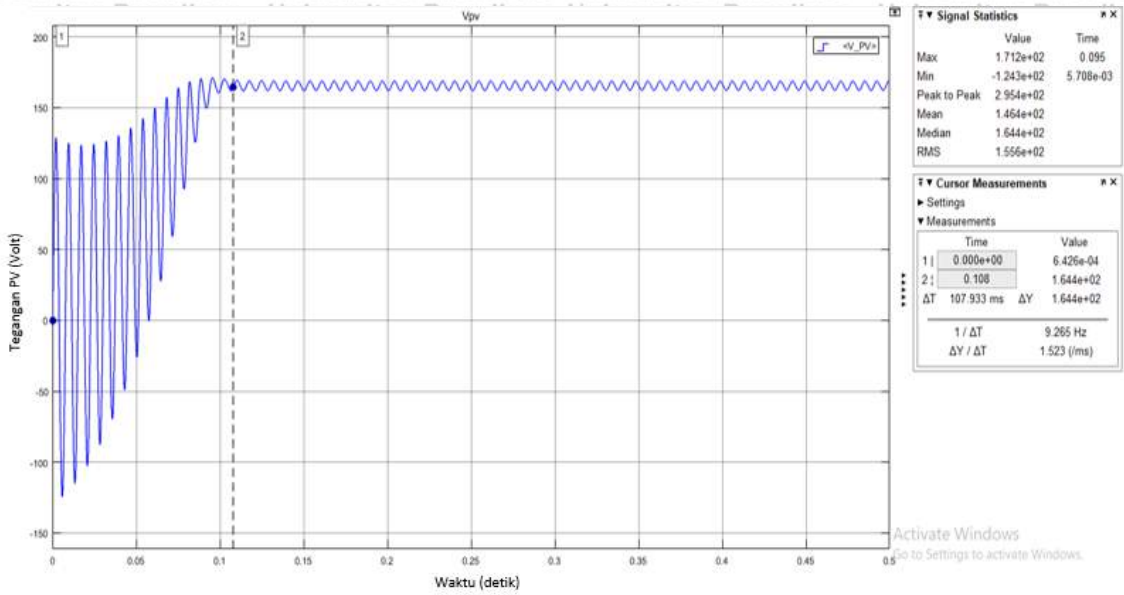
1. Lampiran 1 Rangkaian Subsistem SMC



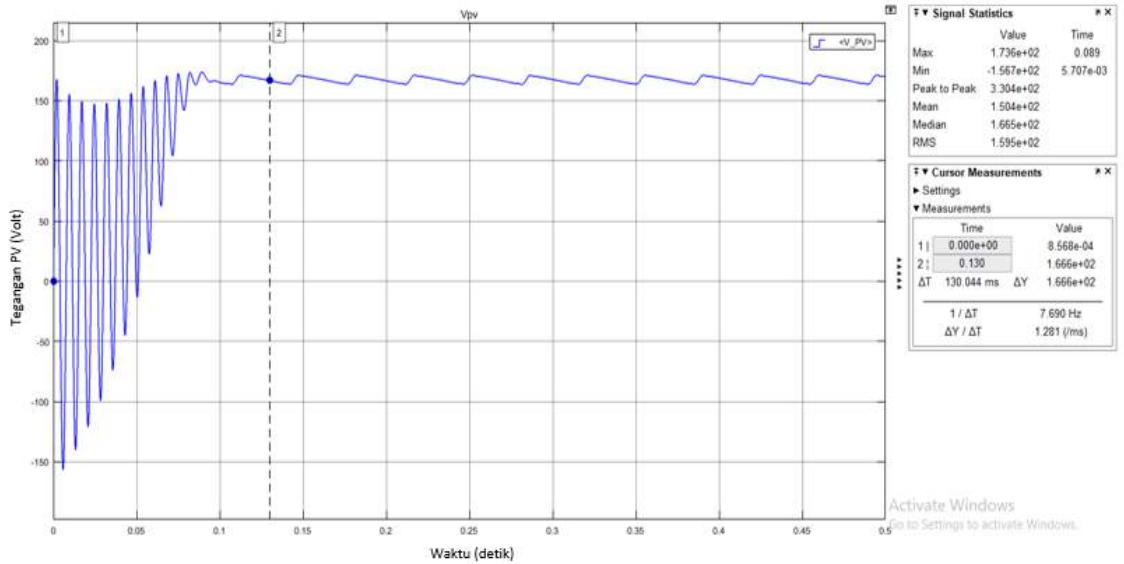
2. Lampiran 2 Hasil pengujian Vpv Open Loop Iradiasi 200, 600 dan 800



Hasil simulasi Vpv radiasi 200

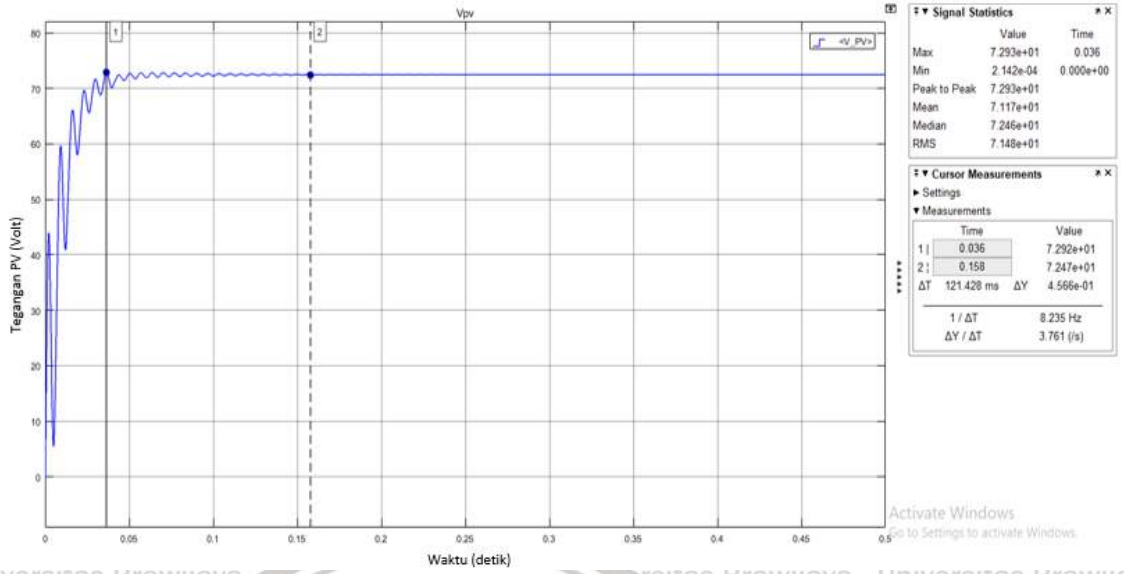


Hasil simulasi Vpv radiasi 600

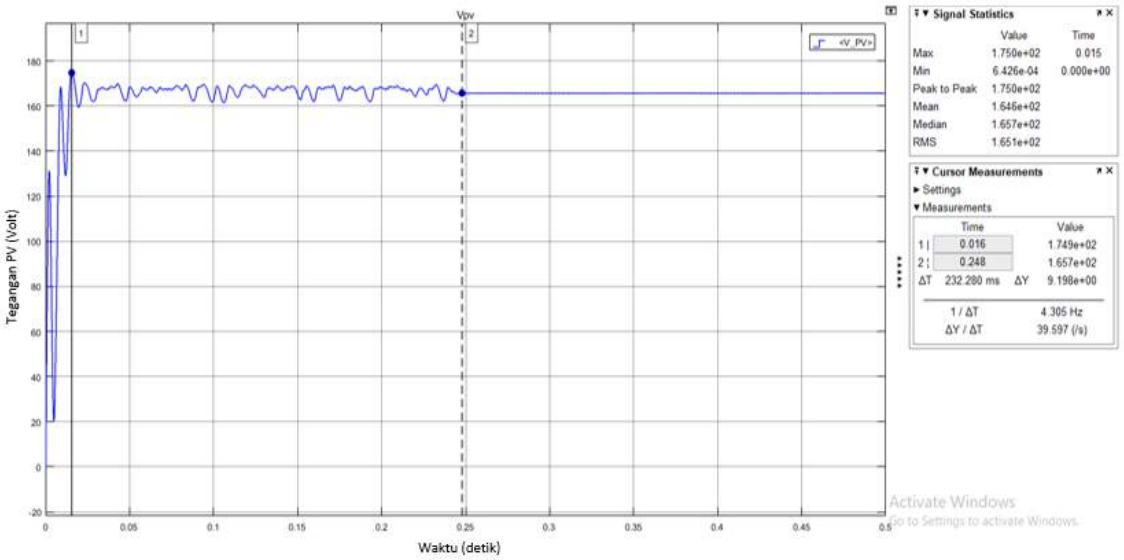


Hasil simulasi Vpv radiasi 800

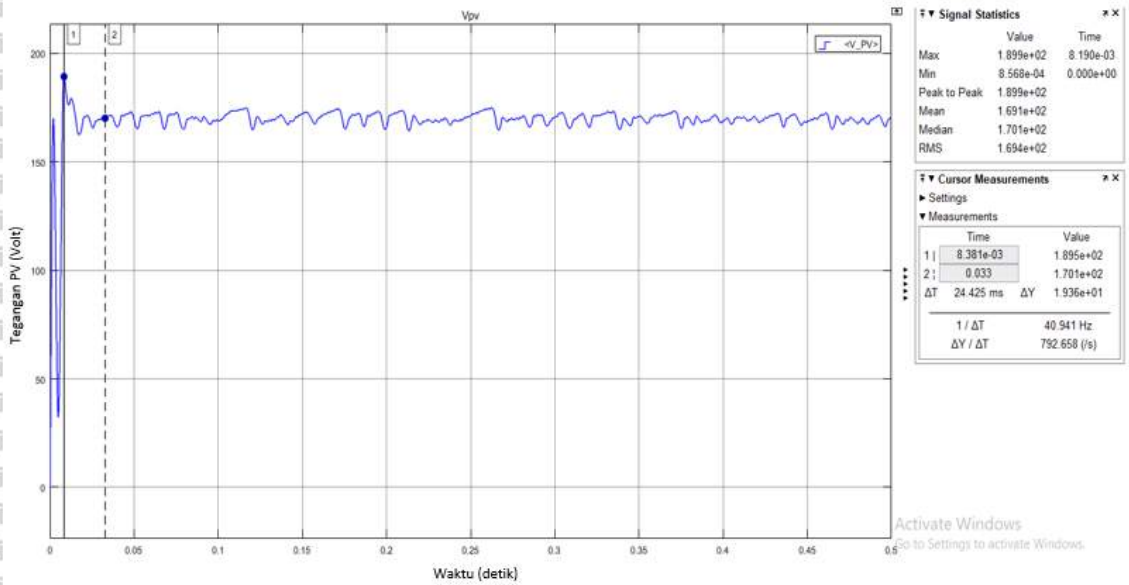
3. Lampiran 3 Hasil pengujian simulasi Vpv menggunakan SMC iradiasi 200, 600 dan 800



Hasil simulasi Vpv radiasi 200

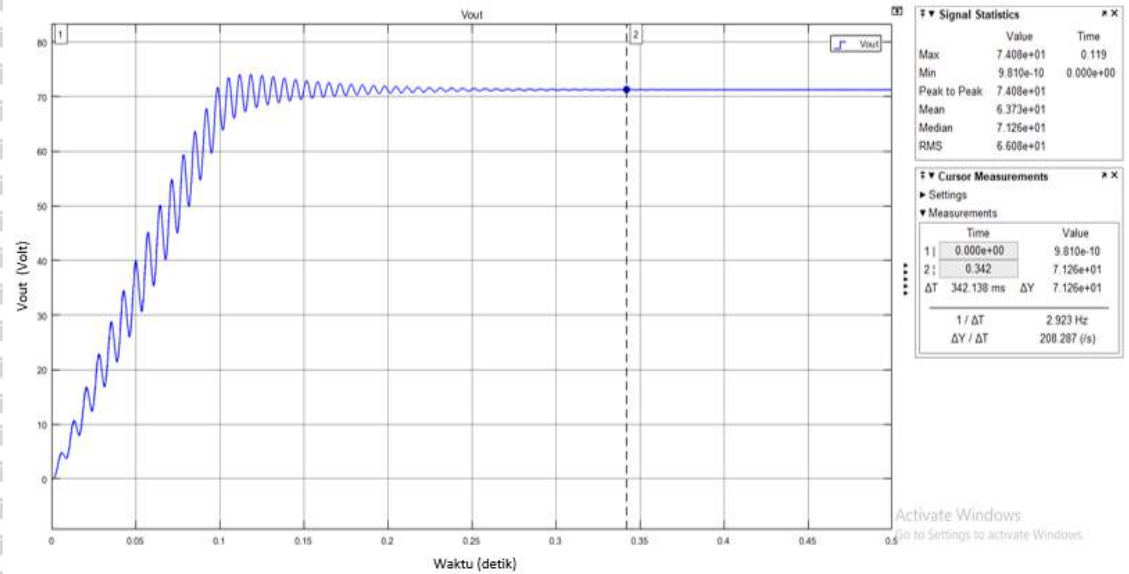


Hasil simulasi Vpv radiasi 600

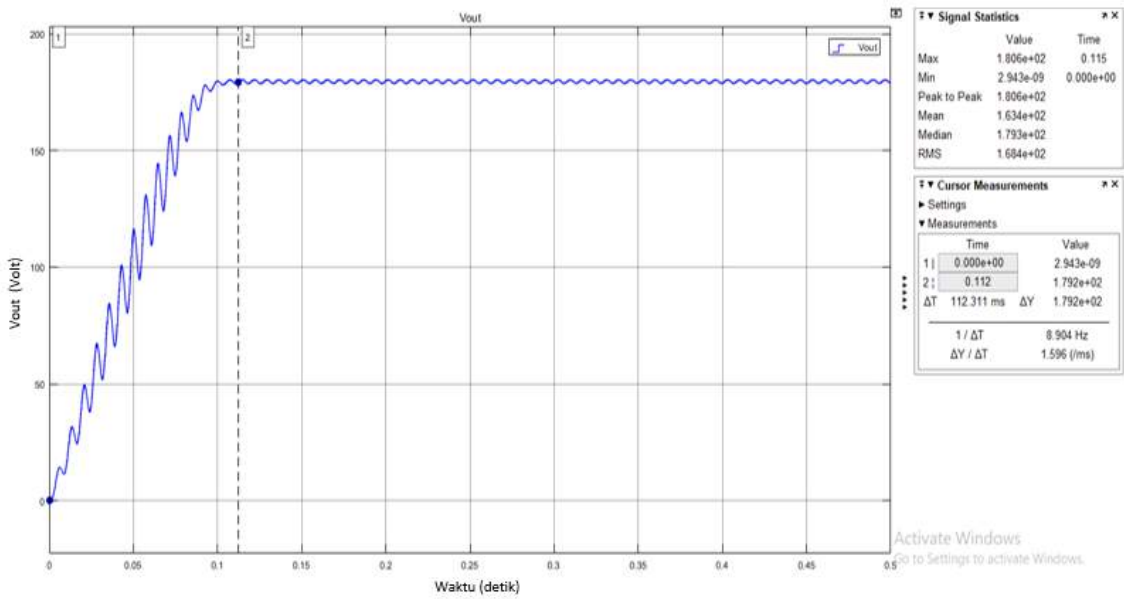


Hasil simulasi V_{pv} radiasi 800

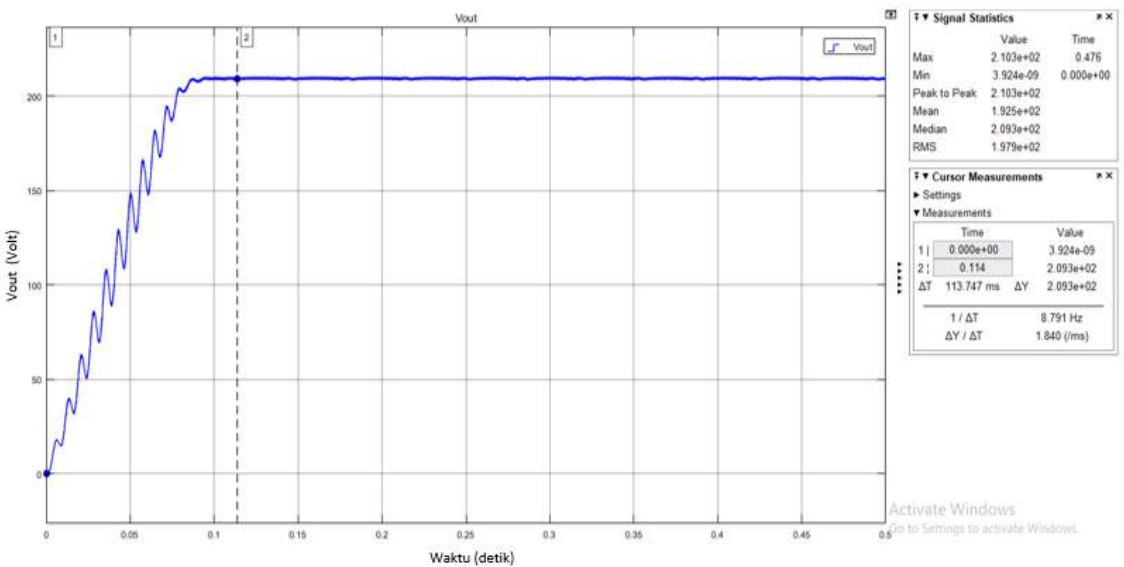
4. Lampiran 4 Hasil pengujian simulasi V_{out} Open Loop iradiasi 200, 600 dan 800



Hasil simulasi V_{out} radiasi 200

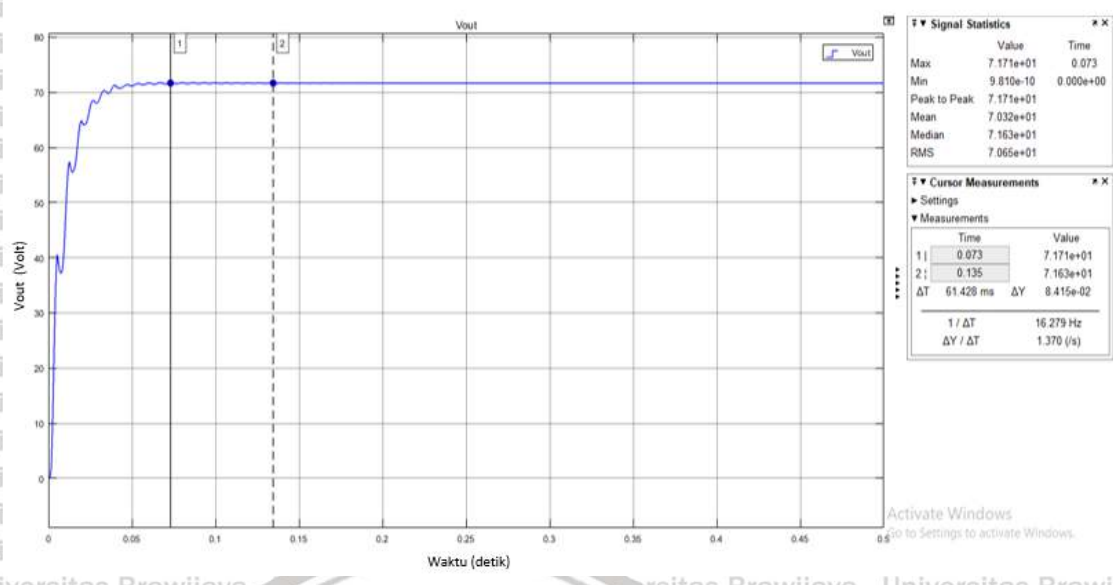


Hasil simulasi Vout radiasi 600

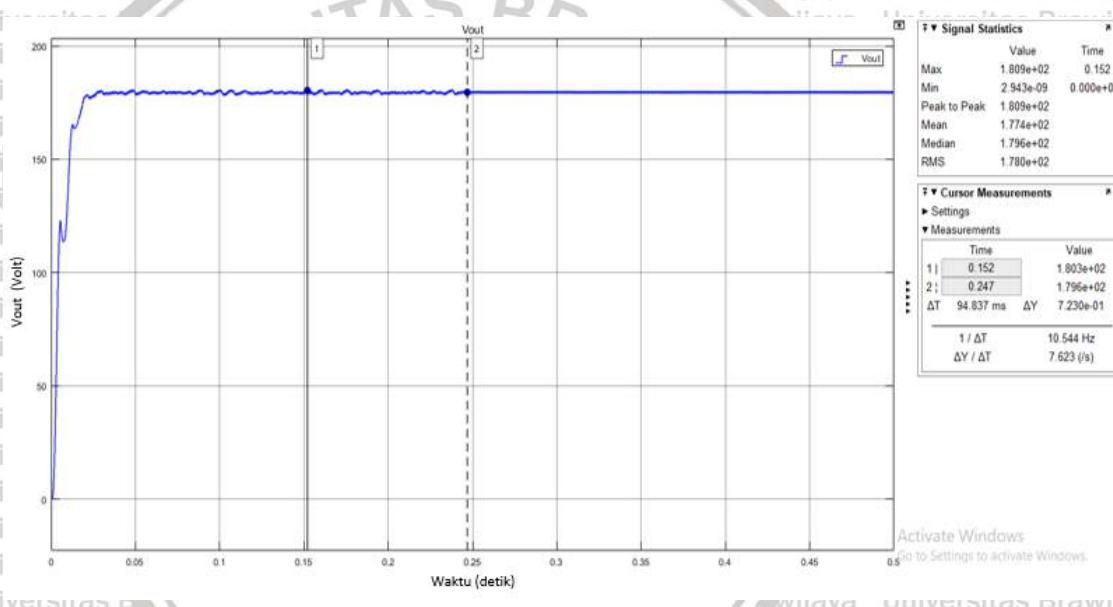


Hasil simulasi Vout radiasi 800

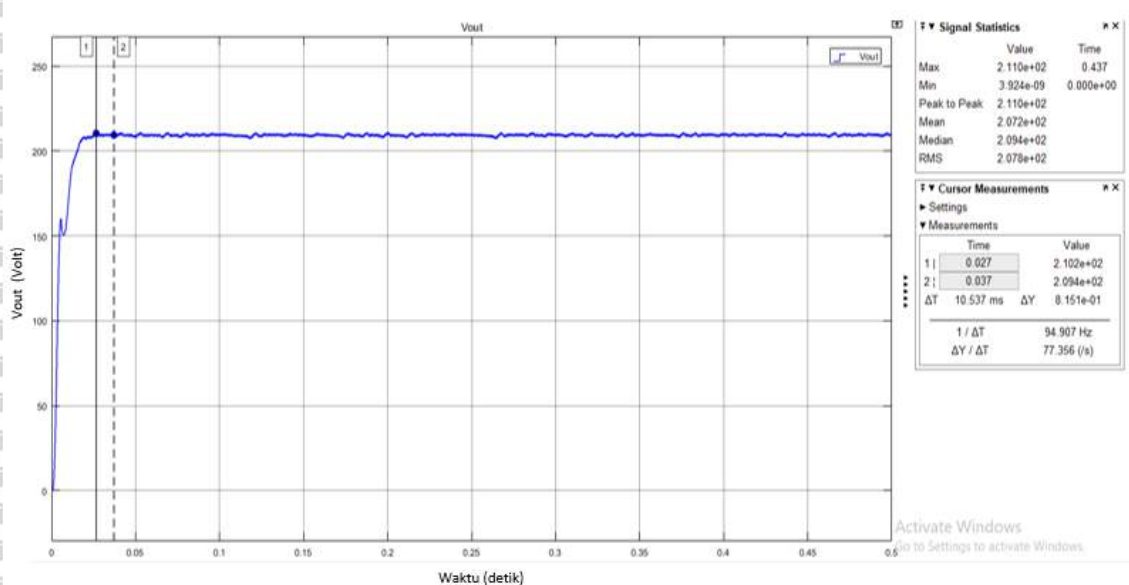
- Lampiran 5 Hasil pengujian simulasi Vout menggunakan SMC iradiasi 200, 600 dan 800



Hasil simulasi Vout radiasi 200

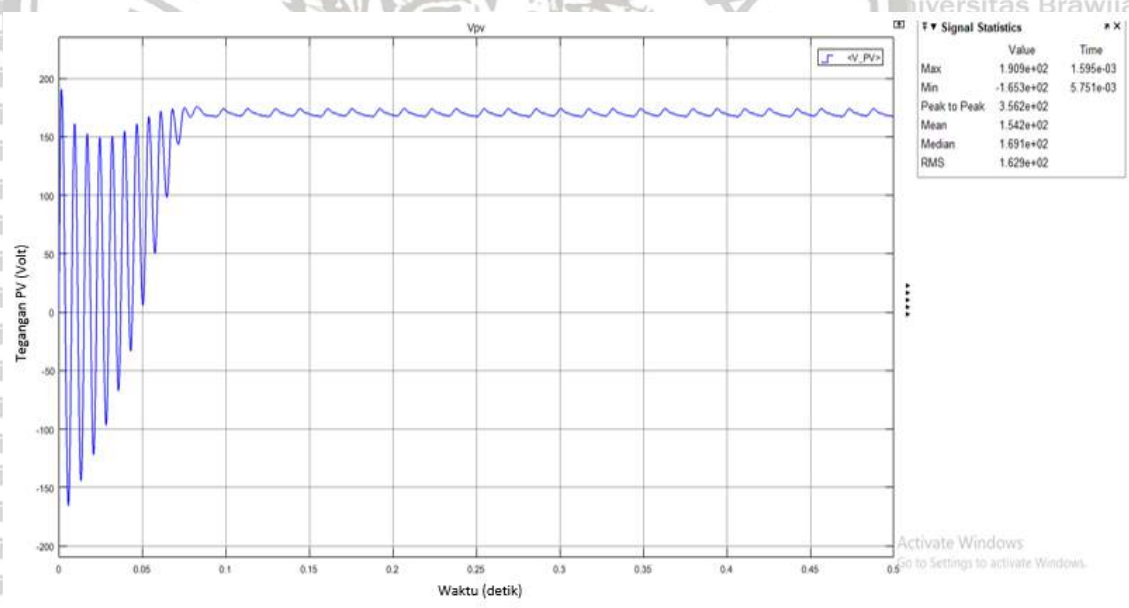


Hasil simulasi Vout radiasi 600

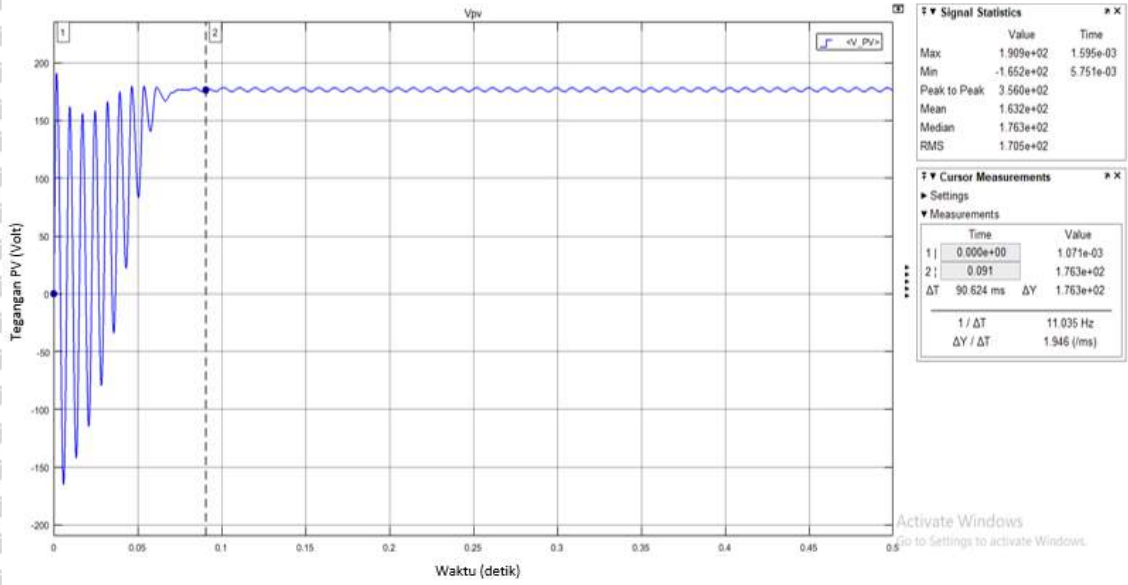


Hasil simulasi V_{out} radiasi 800

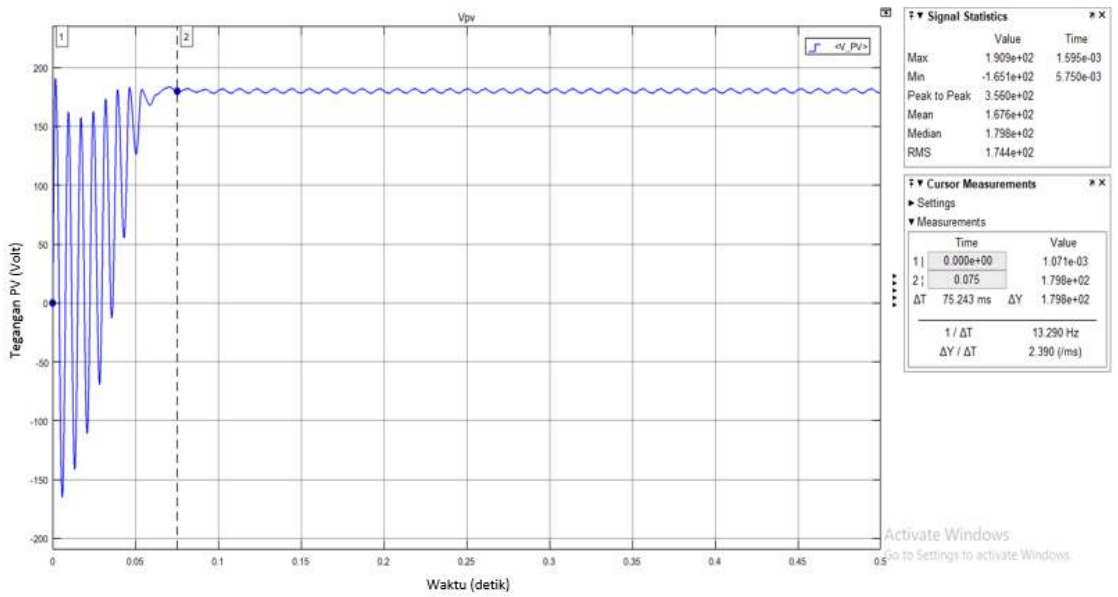
6. Lampiran 6 Hasil pengujian simulasi V_{pv} kondisi Open Loop R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm.



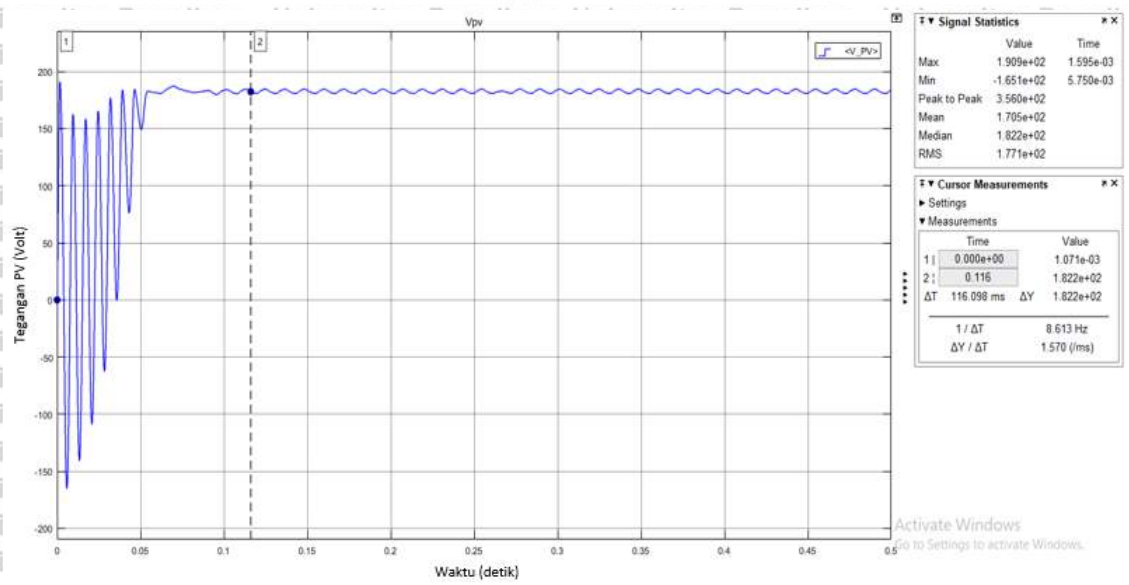
Hasil simulasi R 2 ohm



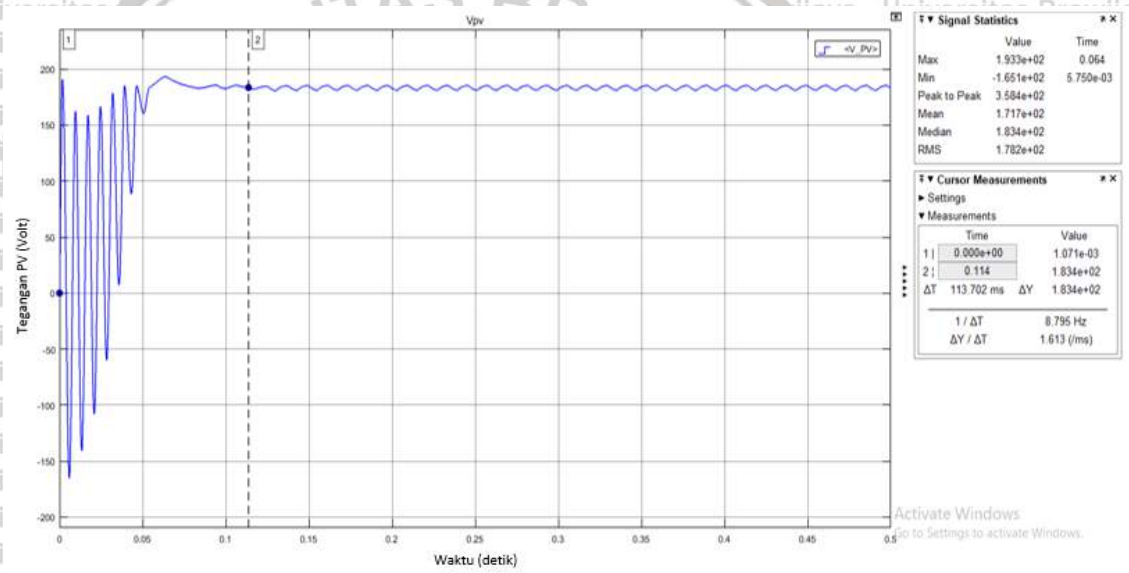
Hasil simulasi R 4 ohm



Hasil simulasi R 6 ohm

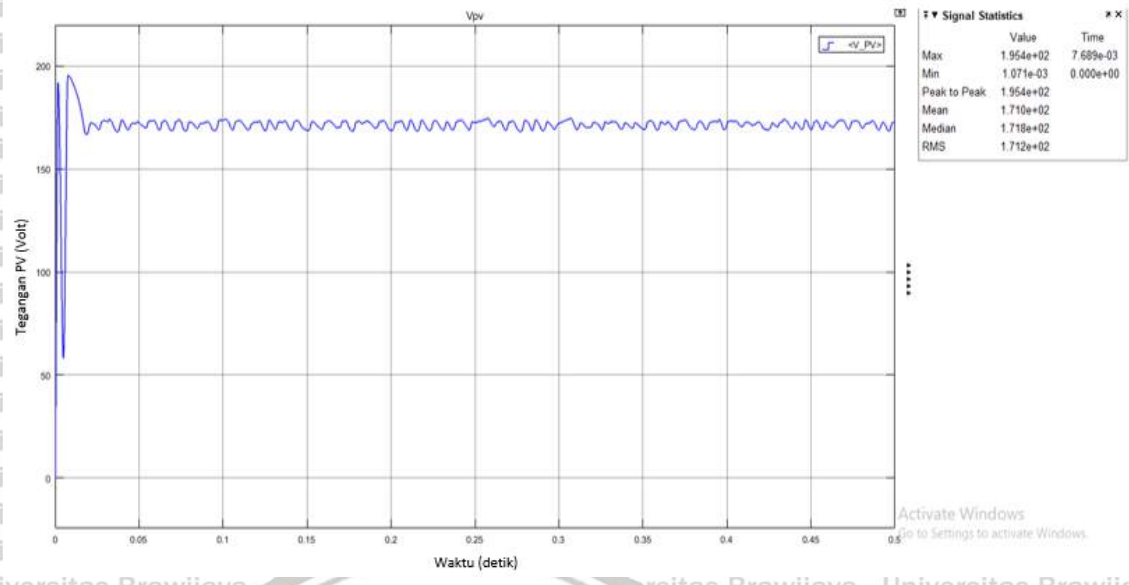


Hasil simulasi R 8 ohm

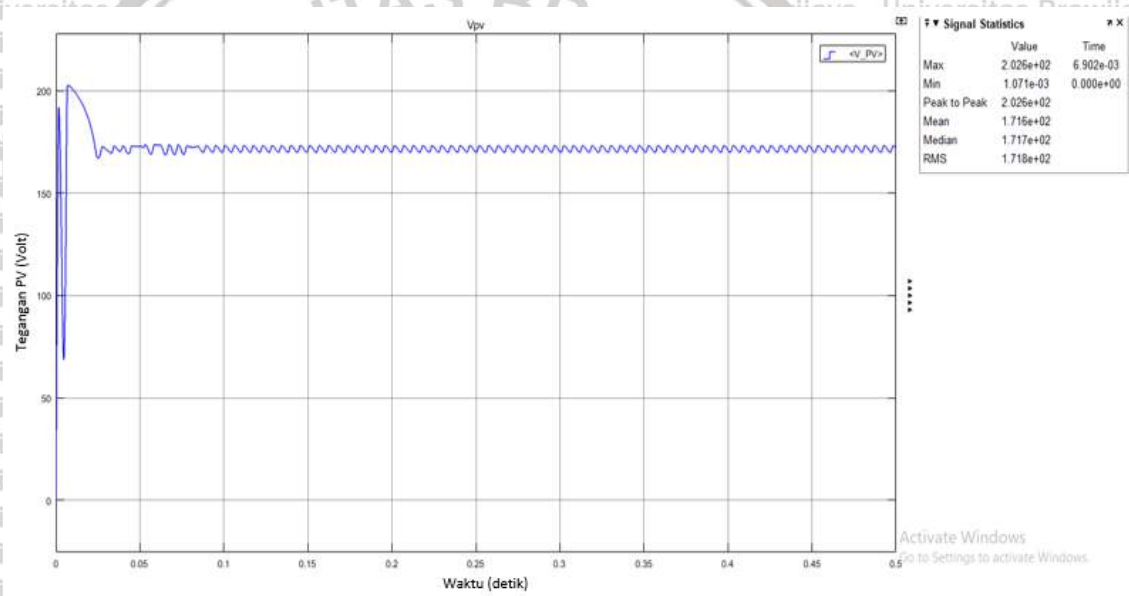


Hasil simulasi R 10 ohm

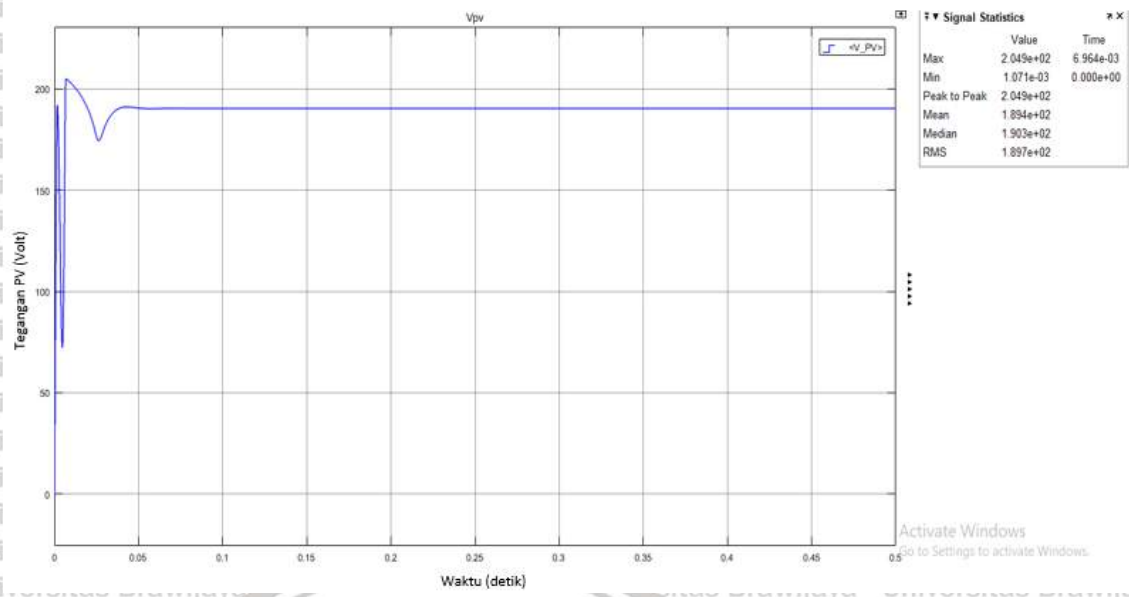
7. Lampiran 7 Hasil pengujian simulasi Vpv menggunakan SMC R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm.



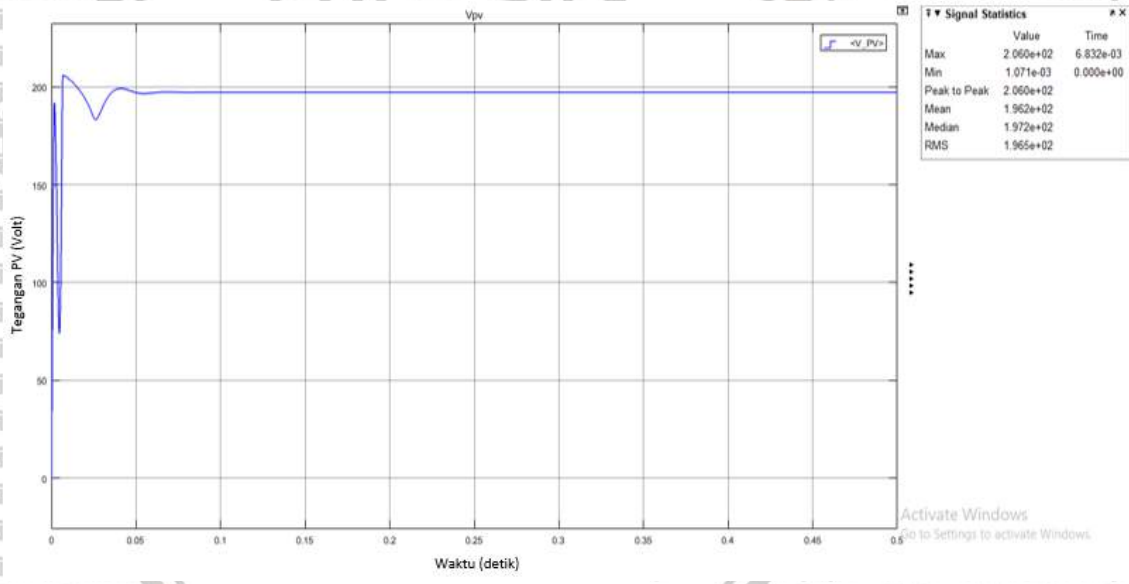
Hasil simulasi R 2 ohm



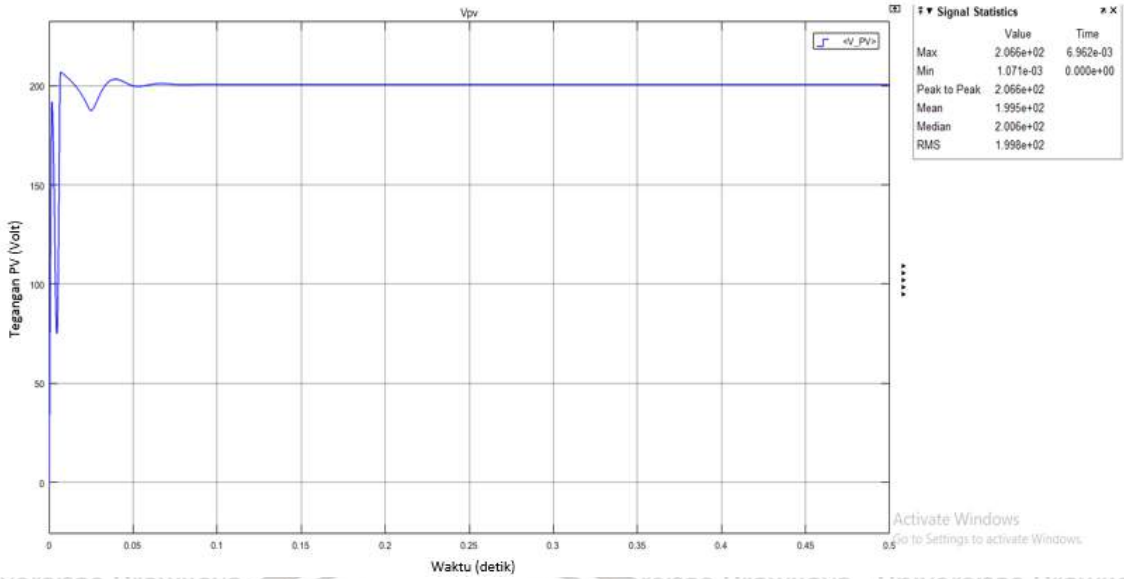
Hasil simulasi R 4 ohm



Hasil simulasi R 6 ohm

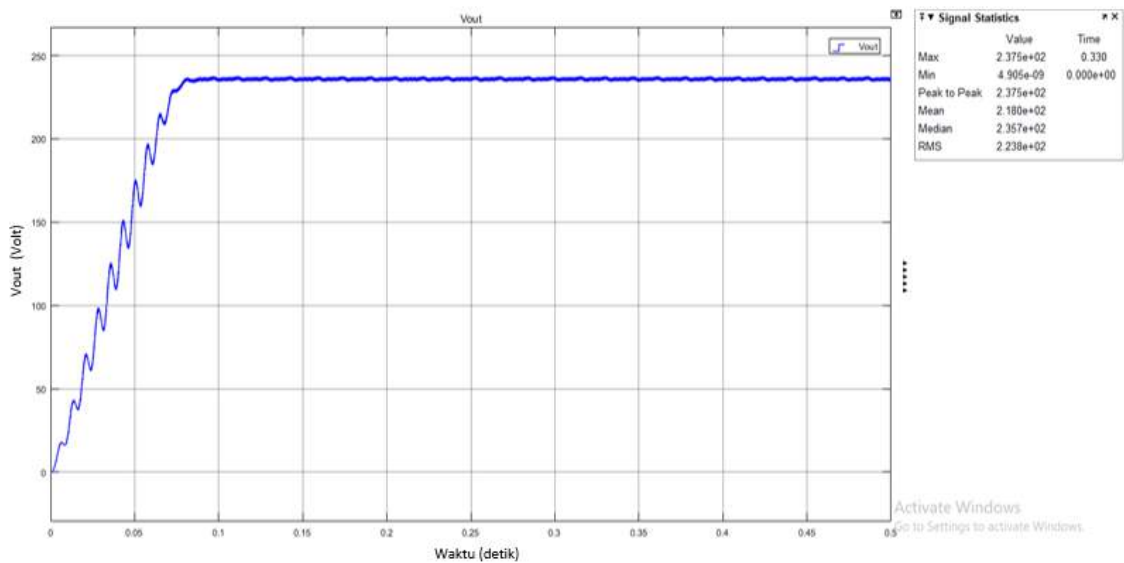


Hasil simulasi R 8 ohm

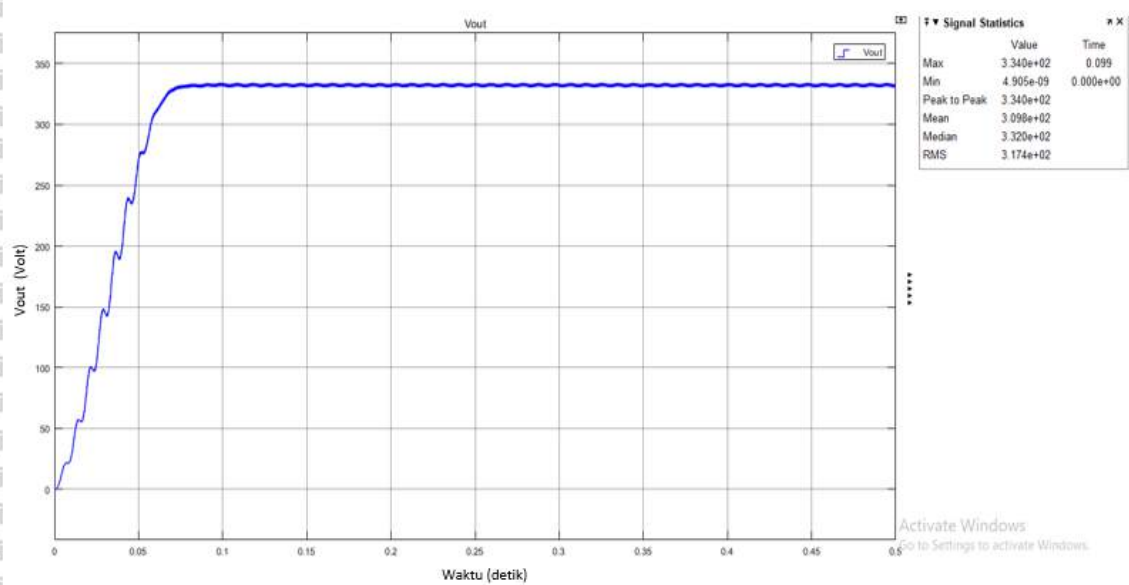


Hasil simulasi R 10 ohm

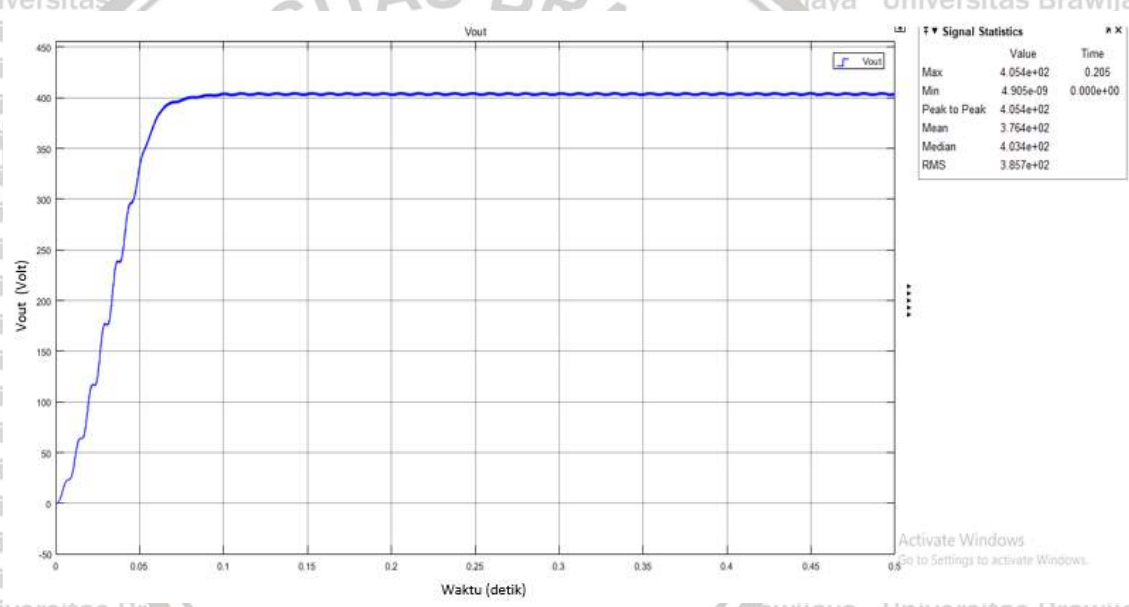
8. Lampiran 8 Hasil pengujian simulasi Vout kondisi Open Loop R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm.



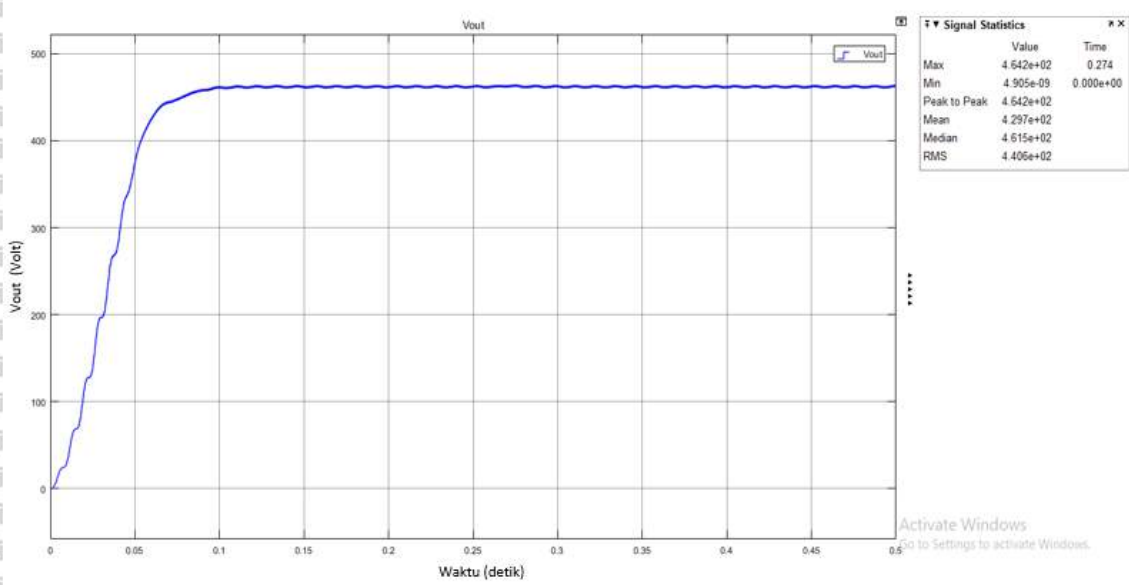
Hasil simulasi R 2 ohm



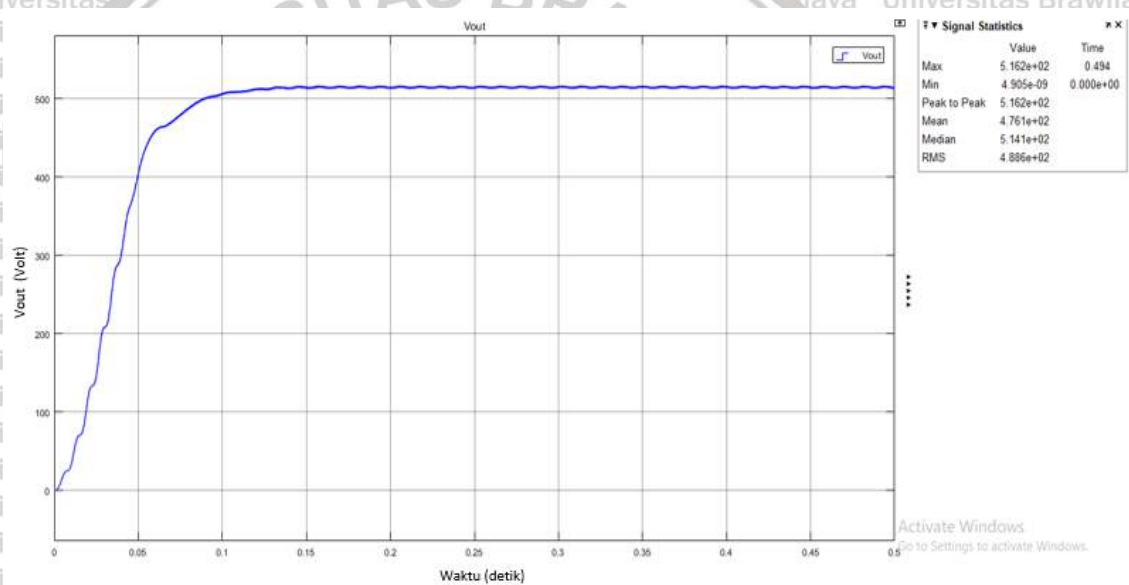
Hasil simulasi R 4 ohm



Hasil simulasi R 6 ohm

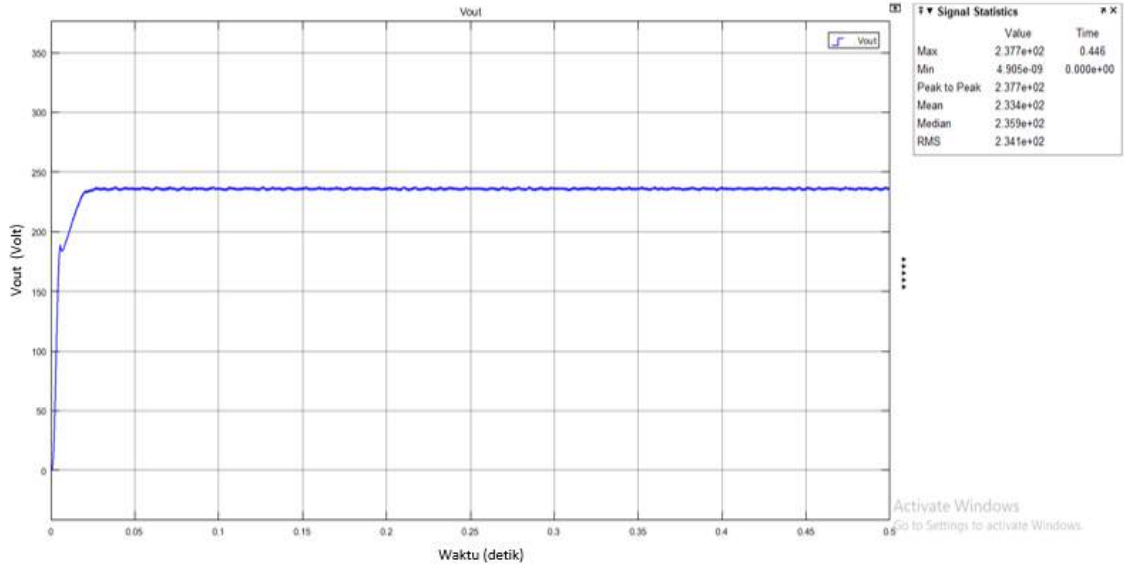


Hasil simulasi R 8 ohm

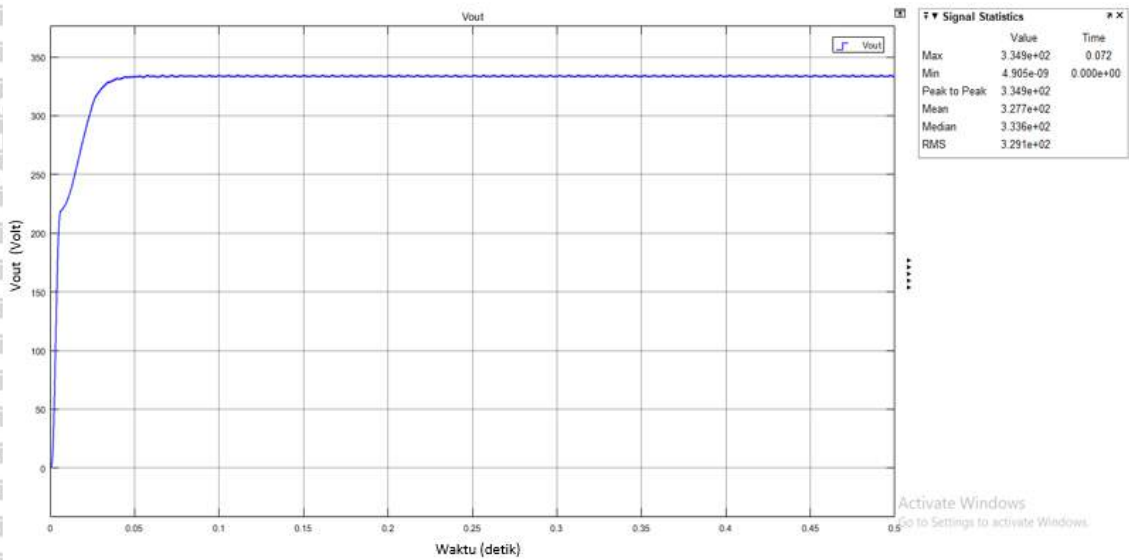


Hasil simulasi R 10 ohm

9. Lampiran 9 Hasil pengujian simulasi Vout menggunakan SMC R berubah 2, 4, 6, 8 dan 10 ohm.

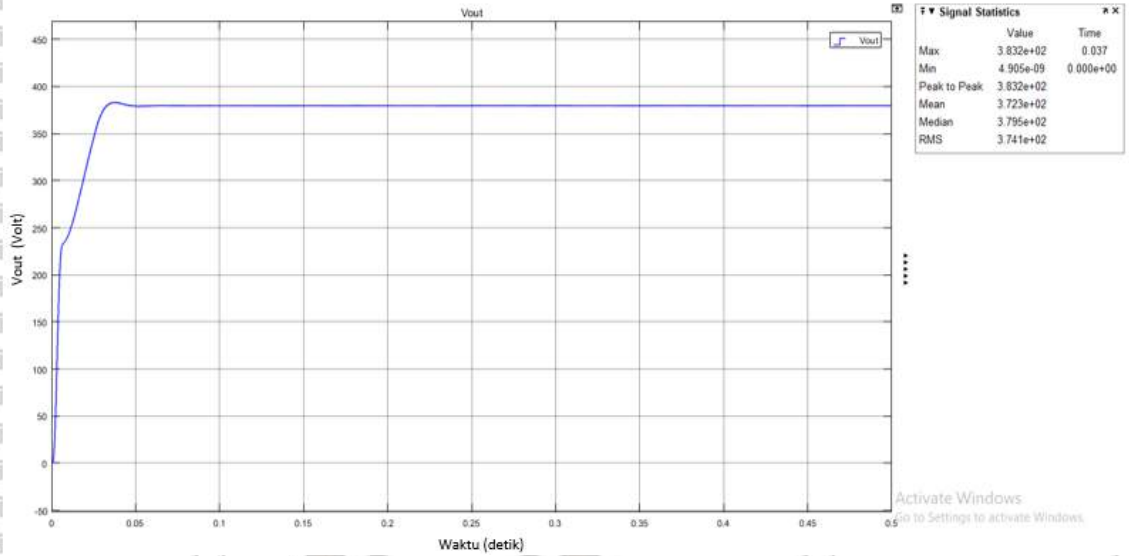


Hasil simulasi R 2 ohm

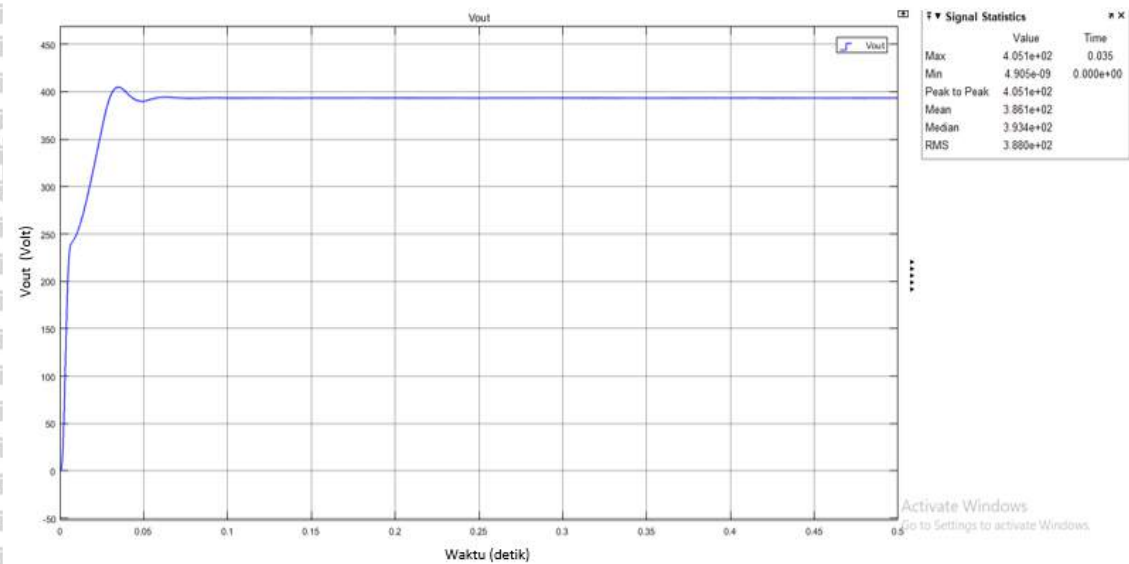


Hasil simulasi R 4 ohm

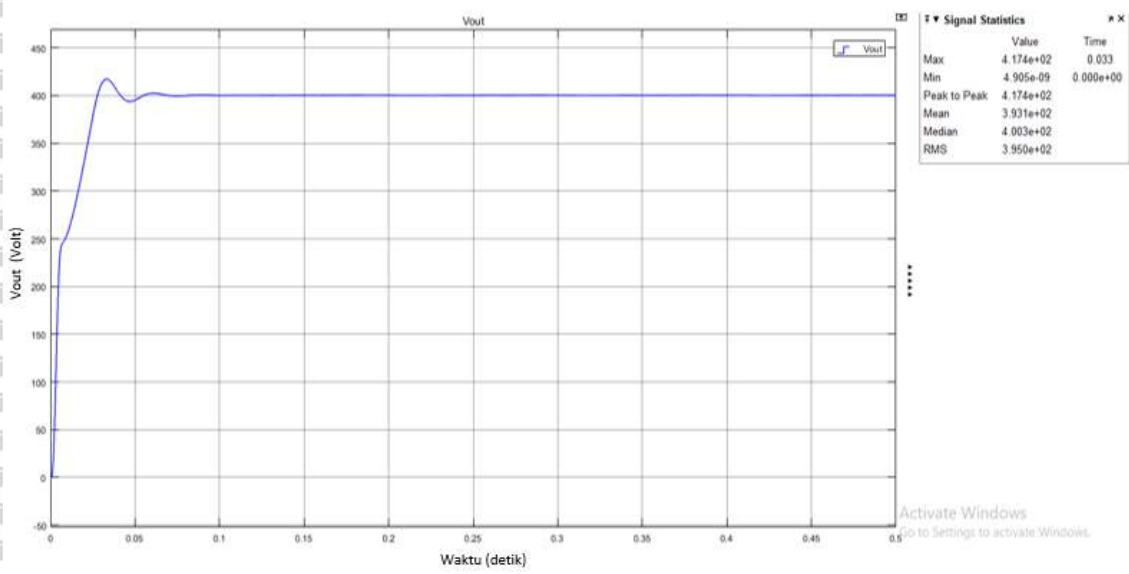




Hasil simulasi R 6 ohm



Hasil simulasi R 8 ohm



Hasil simulasi R 10 ohm

