



**IMPLEMENTASI DC/DC TIPE SEPIC PADA GENERATOR
TERMOELEKTRIK MENGGUNAKAN KONTROL MPPT
*INCREMENTAL CONDUCTANCE (InC)***

Skripsi

Oleh

**Mohamad Choirul Anwar
NIM 131910201006**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO STRATA 1
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2017



**IMPLEMENTASI DC/DC TIPE SEPIC PADA GENERATOR
TERMOELEKTRIK MENGGUNAKAN KONTROL MPPT
*INCREMENTAL CONDUCTANCE (InC)***

Skripsi

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

Oleh

**Mohamad Choirul Anwar
NIM 131910201006**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO STRATA 1
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2017**

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas kasih setia-Nya yang telah melimpahkan segala rahmat yang tak ternilai, sehingga saya bisa menyelesaikan penelitian ini.

Akhirnya, saya persembahkan skripsi ini kepada:

1. Allah SWT yang Maha atas segalanya
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang menjadi suri tauladan bagi seluruh manusia.
3. Kedua Orangtua, Ibu Sriah dan Bapak Sahroni yang tidak pernah lelah memberikan doa, memberikan dukungan moril maupun materiil dan kasih sayang yang tidak pernah henti diberikan kepada saya.
4. Bapak Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing menyelesaikan tugas akhir.
5. Rekan-rekan satu DPU dan DPA pejuang skripsi.
6. Keluarga besar INTEL dan penghuni Kontrakan Pojok yang senantiasa menemani dan membantu dalam suka dan duka.
7. Almamater Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.

MOTTO

“Dan Dia memberinya rezeki dari arah yang tidak disangka-sangka nya. Dan barang siapa bertawakal kepada Allah, niscaya Allah akan mencukupkan (keperluan)nya. Sesungguhnya Allah melaksanakan urusan-Nya. Sungguh, Allah telah mengadakan ketentuan bagi setiap sesuatu ”

(QS Al-Baqarah 45)¹

“Aku akan bersabar hingga kesabaran tak mampu menahan kesabaranku. Aku akan bersabar hingga Allah memperkenankan urusanku. Aku akan bersabar hingga kesabaran tahu bahwa aku bersabar atas sesuatu yang lebih pahit daripada kesabaran itu sendiri”

(Imam Syafi’i)²

“Maksiat yang melahirkan ketaatan lebih baik dari pada ketaatan yang melahirkan kesombongan”.

(Ibnu Athaillah Al-Iskandari)³

¹ Kementrian Agama RI. 2007. *Al Qur'an dan Terjemahannya Dilengkapi dengan Kajian Usul Fiqih dan Intisari Ayat*. Bandung : Syaamil quran.

² Muhammad Al-Faiz & Juman Rofarif. 2016. *Al-Hikam Imam Syafi'I Mutiara Hikmah & Syair Indah Imam Ahlussunnah*. Jakarta : Zaman

³ Ibnu Athaillah. 2015. *Mengaji Tajul 'Arus Rujukan Utama Mendidik Jiwa*. Jakarta : Zaman

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mohamad Choirul Anwar

NIM : 131910201006

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ” Implementasi DC/DC Tipe SEPIC Pada Generator Termoelektrik Menggunakan Kontrol MPPT *Incremental conductance* (InC)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, Juli 2017

Yang menyatakan,

Mohamad Choirul Anwar

NIM 131910201006

SKRIPSI

**IMPLEMENTASI DC/DC TIPE SEPIC PADA GENERATOR
TERMOELEKTRIK MENGGUNAKAN KONTROL MPPT
*INCREMENTAL CONDUCTANCE (InC)***

Oleh

Mohamad Choirul Anwar

NIM 131910201006

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Azmi Saleh, S.T. M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Suprihadi Prasetyono, S.T. M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Implementasi DC/DC Tipe SEPIC Pada Generator Termoelektrik Menggunakan Kontrol MPPT *Incremental conductance* (InC)” karya Mohamad Choirul Anwar telah diuji dan disahkan pada :

Hari :
Tanggal :
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim penguji,

Ketua,

Anggota I,

Dr Azmi Saleh, S.T., M.T.
NIP 198511102014041001

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 198405312008121004

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Tri Wahyu Hardianto, S.T., M.T.
NIP 197804052005011002

Ir. Widyono Hadi, M.,T.
NIP 196801191997021001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.
NIP 196612151995032001

RINGKASAN

Implementasi DC/DC Tipe SEPIC Pada Generator Termoelektrik Menggunakan Kontrol MPPT *Incremental conductance* (InC); Mohamad Choirul Anwar, 131910201006; 2017; 111 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat serta tidak diimbangi dengan pemenuhan energi yang berimbang akan menimbulkan krisis energi listrik. Hal ini memerlukan pemenuhan energi listrik agar tidak timbul krisis energi. Pemanfaatan cadangan energi fosil harus diminimalisir, sehingga diperlukan sumber lain seperti halnya energi baru dan terbarukan (EBT). Disamping itu terdapat energi lain yang belum dimanfaatkan, yaitu energi buangan berupa panas dari aktifitas manusia seperti industri, transportasi dsb. Energi tersebut dapat dimanfaatkan kembali dengan memanfaatkan termoelektrik generator (TEG) untuk dijadikan listrik

Generator termoelektrik (TEG) merupakan salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas untuk dikonversikan menjadi energi listrik. TEG bekerja berdasarkan adanya perbedaan temperatur pada kedua sisi modul. Modul TEG terdiri dari semikonduktor tipe P dan tipe N yang disatukan. Semakin besar perbedaan temperatur, maka semakin besar daya yang dihasilkan oleh TEG. Namun pemanfaatan TEG masih memiliki efisiensi yang kecil disebabkan perubahan temperatur yang dinamis. Sehingga diperlukan metode yang dapat memaksimalkan daya yang dihasilkan TEG yaitu dengan menggunakan algoritma *maximum power point tracker* (MPPT). MPPT bekerja dengan mengontrol DC/DC melalui perubahan PWM untuk mencari titik daya maksimum yang dapat dihasilkan TEG. Melalui *input* arus dan tegangan TEG, MPPT akan menentukan berapa *duty cycle* agar energi yang dihasilkan TEG dapat mencapai titik daya maksimum.

Pada penelitian ini digunakan modul TEG sebanyak 3 buah. Sedangkan DC/DC yang digunakan adalah tipe SEPIC karena dapat bekerja sebagai penurun tegangan (*buck*) dan penaik tegangan (*boost*). Sedangkan algoritma MPPT yang

digunakan adalah *incremental conductance* (InC). MPPT akan diaplikasikan pada mikrokontroler Arduino MEGA

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi : konverter SEPIC, TEG, baterai, algoritma MPPT InC, dan sistem *charging* baik secara *direct* maupun dengan MPPT InC. hasil pengujian konverter SEPIC menunjukkan konverter yang didesain sudah bekerja dan memiliki efisiensi rata-rata sebesar 60%. TEG yang telah didesain dapat menghasilkan tegangan *open circuit* (V_{OC}) sebesar 11.25 V dan arus *short circuit* (I_{SC}) sebesar 1.45 A. Baterai yang telah diuji juga masih dalam kondisi baik dengan kapasitas baterai sebesar 6 V 4.5 Ah. Sedangkan algoritma MPPT InC yang telah dibuat telah mampu bekerja dengan baik dalam mencari titik daya maksimum. Saat dilakukan pengujian *charging* menggunakan TEG dengan beda temperatur (ΔT) sebesar 119° , daya *charging* dengan *direct* (P_{direct}) mencapai 1.24 W. Sedangkan pada saat menggunakan MPPT InC, daya meningkat hingga 1.7 W. peningkatan daya mencapai 0.46 W atau sekitar 37%. Namun saat pengujian sistem *charging* pada 3 kondisi baterai yang berbeda dengan TEG, konverter tidak dapat bekerja sebagai *buck*, hal ini dikarenakan tegangan TEG tidak mampu berada diatas tegangan baterai. Sehingga dilakukan pengujian lagi menggunakan *power supply* dengan tegangan baterai 4.4 V, 6.22 V, dan 6.5V. Hasil yang telah didapat menunjukkan bahwa, MPPT telah mampu mengkondisikan konverter bekerja sebagai *buck* maupun *boost* dalam mencari titik daya maksimum.

Kesimpulan dari penelitian ini yaitu MPPT InC mampu meningkatkan daya *charging* hingga 37 % lebih besar dibandingkan dengan tanpa MPPT. Namun MPPT InC masih memiliki *power losses* (PLS) pada konverter SEPIC, hal ini menyebabkan turunnya efisiensi konverter. Disamping itu TEG yang telah didesain cukup berpotensi untuk menghasilkan energi listrik. Tetapi untuk mencapai target *mencharging* baterai 6 V 4.5 Ah selama 2.5 jam membutuhkan biaya cukup besar yaitu Rp.32.886.000, tetapi besarnya biaya dapat diminimalisir dengan cara meningkatkan ΔT melalui penyempurnaan desain TEG agar daya yang dihasilkan TEG lebih maksimal.

SUMMARY

Implementation of DC/DC SEPIC Type on Thermoelectric Generator Using MPPT Control Incremental conductance (InC); Mohamad Choirul Anwar, 131910201006; 2017; 111 pages; Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, University of Jember.

Electrical energy needs are ever-increasing and not balanced with a fulfillment of the balanced energy will cause the electric energy crisis. This requires the fulfillment of electric energy in order not to arise an energy crisis. Utilization of fossil energy reserves should be minimized, so it is necessary to other sources as well as new and renewable energy. In addition, there are other untapped energies, namely the energy waste in the form of heat from human activities such as industry, transportation etc. That energy can be utilized again by utilizing a thermoelectric generator (TEG) for electricity

Thermoelectric generator (TEG) plant is one that utilizes the thermal energy to be converted into electrical energy. TEG work based on the presence of a temperature difference on both sides of the module. TEG module consists of a semiconductor P-type and N-type combined. The greater the temperature difference, then the greater the power generated by the TEG. However, the utilization of TAG still has a small efficiency due to temperature change that dynamic. So that the required method that maximizes the power generated TEG by using the algorithm of maximum power point tracker (MPPT). MPPT working with DC/DC control via PWM changes to find the point of maximum power that can be generated TAG. Through the input current and voltage, MPPT TAG will determine how duty cycle so that the energy generated TEG can reach the point of maximum power.

This research module is used on the TEG as much as 3 pieces. While DC/DC SEPIC type is used because it can work as a decreasing voltage (buck) and increase voltage (boost). While the MPPT algorithm used is incremental conductance (InC). MPPT will be applied on the Arduino MEGA microcontroller.

The testing of this research includes SEPIC converter, TEG, MPPT InC algorithm, battery, and charging system either in direct or with MPPT InC. SEPIC converter test results indicating the converter designed already working and have an average efficiency of 60%. The TEG has been designed can generate open circuit voltage (VOC) of 11.25 V and currents of the short circuit (ISC) of 1.45 A. Batteries that have been tested are also still in good condition with a battery capacity of 6 V 4.5 Ah. While the MPPT InC algorithm that has been made, it has been able to work well in seeking the maximum power point. When done testing charging using the TEG with ΔT about 120 °C, with direct charging power (P_{direct}) reached 1.24 W. Whereas at the moment use MPPT InC, charging power (P_{mppt}) increased up to 1.7 W. The increased power reached 0.46 W or about 37%. However, when testing the system charging battery condition on 3 different TEG, the converter may not work as a buck, this is due to the TEG voltage not being able to above the battery voltage. So do the test again using a power supply with a battery voltage of 4.4 V, V, and 6.22 6.5 V. The results that have been obtained, indicating that the MPPT has been able to customize the converter works as a buck or boost in search of maximum power point.

The conclusions of this research that is capable of improving power MPPT Inc. charging up to 0.46 W or 37% greater compared to without MPPT. But the MPPT InC. still, has power losses (PLS) at SEPIC converter, this makes decrease the efficiency of the converter. In addition, the TEG has been designed potentially enough to generate electrical energy. But to achieve the target for charging battery 6 V 4.5 Ah during 2.5 hours requires considerable expenses about. Rp. 32.886.000, but the magnitude of costs can be minimized by means of increasing the ΔT through the refinement of the design TEG so that the resulting TEG more power.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang maha kuasa atas segalanya, karena dengan ridho, hidayah dan petunjukNya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Implementasi DC/DC Tipe SEPIC pada Generator Termoelektrik Menggunakan Kontrol MPPT Incremental conductance (InC)**”. Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak yang turut memberikan bantuan berupa motivasi, inspirasi, bimbingan, doa, fasilitas dan dukungan lainnya yang membantu memperlancar pengerjaan skripsi ini.

Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada.

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rezeki, rahmat, hidayah dan karunia serta kasih sayang-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang telah menjadi suri tauladan bagi seluruh umat.
3. Kedua Orangtua Ibu Sriah dan Bapak Sahroni yang telah membesarkan, mendidik, mendoakan tiada henti, memberi motivasi semangat, menitikkan air mata dan memberi kasih sayang yang tak pernah habis serta pengorbanannya selama ini, serta keluarga besar;
4. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
5. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
6. Bapak Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing menyelesaikan tugas akhir ini;
7. Bapak Dr. Tri Wahyu Hardianto, S.T., M., T. dan Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku dosen penguji yang sudah memberikan saran untuk memperbaiki tugas akhir ini;
8. Suwandi, Eki, dan teman Seperjuangan yang sangat membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini dari pemberian semangat hingga membantu pelaksanaan di lapangan;

9. Keluarga besar INTEL'UJ 2013, terimakasih telah memberikan arti kekeluargaan yang luar biasa;
10. Kontrakan Pojok yang senantiasa menemani dan membantu dalam suka dan duka;
11. Keluarga besar KEMAPATA yang telah memberikan banyak pelajaran hidup serta mengajarkan kekeluargaan;
12. U.S yang selalu menginspirasi untuk selalu memperbaiki diri;
13. Keluarga besar Civitas Akademia Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah mendukung dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin ilmu teknik elektro. Kritik dan saran yang membangun diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan skripsi ini dan dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya;

Jember, 17 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Termoelektrik Generator (TEG)	4
2.2 DC – DC Converter	7
2.2.1 DC Chopper	7
2.2.2 Topologi Penurun Tegangan (<i>Buck converter</i>)	9
2.2.3 Topologi Penaik Tegangan (<i>Boost converter</i>)	10
2.2.4 Topologi Penurun dan Penaik Tegangan (<i>Buck-boost converter</i>).....	10
2.2.5 Topologi CUK.....	11

2.2.6 Topologi SEPIC	12
2.3 SEPIC Konverter	13
2.3.1 Cara Kerja DC/DC SEPIC	13
2.3.2 Desain Konverter.....	15
2.3.2 <i>Power losses</i> Dan Efisiensi Konverter SEPIC	18
2.3 <i>Maximum Power Point Tracker</i> (MPPT).....	20
2.3.1 <i>Incremental conductance</i> (InC).....	21
2.3.2 PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>).....	23
2.4 Baterai <i>Valve Regulated Lead Acid</i> (VRLA).....	23
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	25
3.2 Tahapan Penelitian.....	26
3.3 Alat dan Bahan.....	28
3.3.1 Alat.....	28
3.3.2 Bahan.....	28
3.4 Desain Sistem.....	29
3.4.1 Perancangan TEG.....	30
3.4.2 Perancangan Konverter SEPIC	34
3.4.3 Baterai VRLA 6V 4.5Ah.....	43
3.4.4 Flowchart MPPT <i>Incremental conductance</i>	44
3.5 Desain <i>Hardware</i>	46
3.6 Rencana Pengujian Potensi Termoelektrik Generator (TEG).....	48
3.6.1 Pengujian Konverter DC/DC Tipe SEPIC	48
3.6.2 Pengujian MPPT	49
3.6.3 Pengujian Sistem dan Potensi TEG.....	50
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Hasil Perancangan Datalogger	53
4.2 Hasil Perancangan Driver MOSFET	53
4.3 Hasil Pengujian dan Analisa Konverter SEPIC.....	54
4.3.1 Pengujian Konverter SEPIC Tanpa Beban.....	55
4.3.2 Pengujian Konverter dengan Beban.....	57

4.3.3 Analisa <i>Power losses</i> pada Konverter	63
4.4 Hasil Pengujian dan Analisa MPPT <i>Incremental conductance</i>	69
4.5 Pengujian TEG	73
4.5.1 Pengujian Karakteristik TEG Tanpa Beban	73
4.5.2 Pengujian Karakteristik TEG Berbeban	76
4.6 Pengujian Sistem <i>Charging</i> Baterai dengan TEG	78
4.6.1 Pengujian <i>Direct Charging</i> dengan TEG	78
4.6.2 Pengujian <i>Charging</i> MPPT InC dengan TEG	79
4.6.3 Analisa Perbandingan Daya <i>Charging</i> dengan TEG dan Analisa <i>Power Losses (PLS)</i>	80
4.7 Pengujian Sistem <i>Charging</i> Baterai dengan <i>Power supply</i>	82
4.7.1 Pengujian <i>Direct Charging</i> dengan <i>Power supply</i>	82
4.7.2 Pengujian <i>Charging</i> MPPT InC dengan <i>Power supply</i>	83
4.7.3 Analisa Perbandingan Daya <i>Charging</i> dengan <i>Power supply</i> dan Analisa <i>Power Losses (PLS)</i>	85
4.8 Analisa Potensi TEG	87
BAB 5. PENUTUP	90
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan elektron pada TEG dengan tipe N5

Gambar 2.2 Perpindahan elektron Pada TEG dengan tipe P5

Gambar 2.3 Semikonduktor tipe N dan tipe P yang terhubung6

Gambar 2.4 DC Chopper dengan beban resistif.....8

Gambar 2.5 Step up DC *chopper*8

Gambar 2.6 Rangkaian konverter DC-DC tipe *buck*9

Gambar 2.7 Rangkaian konverter DC-DC tipe *boost*10

Gambar 2.8 Rangkaian konverter DC-DC tipe *buck-boost*11

Gambar 2.9 Konverter DC-DC tipe CUK.....11

Gambar 2.10 Konverter DC-DC tipe SEPIC12

Gambar 2.11 Gelombang *switching* pada SEPIC13

Gambar 2.12 Cara kerja DC/DC tipe SEPIC14

Gambar 2.13 Gelombang *duty cycle*14

Gambar 2.14 Rangkaian SEPIC dengan rugi-rugi dari komponen tahanan dalam 18

Gambar 2.15 Karakteristik dari modul TEG.....20

Gambar 2.16 Grafik *incremental conductance*22

Gambar 2.17 Kerja PWM23

Gambar 2.18 Kontruksi baterai VRLA (Battery).....24

Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....26

Gambar 3.2 Blok diagram sistem.....29

Gambar 3.3 Grafik karakteristik TE-MOD-10W4V-40.....30

Gambar 3.4 Rangkaian modul TEG TE-MOD-10W4V-40.....31

Gambar 3.5 Prototype pengujian modul TEG TE-MOD-10W4V-40.....31

Gambar 3.6 Grafik daya pada pengujian modul TEG dengan beban bervariasi....32

Gambar 3.7 Grafik arus pada pengujian modul TEG dengan beban variabel32

Gambar 3.8 Grafik tegangan pada pengujian modul TEG dengan beban variabel33

Gambar 3.9 Rangkaian dasar SEPIC konverter (Psim)34

Gambar 3.10 Perancangan Induktor.....37

Gambar 3.11 Bentuk fisik baterai 6V/4.5Ah43

Gambar 3.12 Flowchart algoritma MPPT <i>incremental conductance</i> (InC).....	44
Gambar 3.13 Desain hardware TEG	47
Gambar 4.1 Board datalogger	53
Gambar 4.2 Driver MOSFET.....	53
Gambar 4.3 Perbandingan gelombang PWM mikrokontrol	54
Gambar 4.4 Konfigurasi pengujian konverter SEPIC.....	55
Gambar 4.5 Grafik pengaruh perubahan duty cycle terhadap tegangan keluaran konverter tanpa beban dengan Vin 6 V	57
Gambar 4.6 Grafik pengaruh duty cycle terhadap tegangan output pada beban ..	58
Gambar 4.7 Grafik pengaruh duty cycle terhadap arus output pada beban dengan input 6 V	60
Gambar 4.8 Grafik pengaruh duty cycle terhadap daya output pada beban	61
Gambar 4.9 Grafik pengaruh duty cycle terhadap efisiensi pada Vin 6V	62
Gambar 4.10 Persentase power losses tiap komponen konverter SEPIC	66
Gambar 4.11 Sampel program MPPT InC	69
Gambar 4.12 Skema pengujian MPPT InC.....	69
Gambar 4.13 Respon tegangan output terhadap perubahan beban	70
Gambar 4.14 Grafik P_{load} dan V_{load} saat MPPT INC bekerja.....	71
Gambar 4.15 Pengujian MPPT InC pada beban 20.1 ohm	73
Gambar 4.16 Skema pengujian karakteristik TEG tanpa beban	74
Gambar 4.17 Grafik hubungan suhu terhadap tegangan dan arus TEG.....	74
Gambar 4.18 Grafik efisiensi TEG	76
Gambar 4.19 Skema Pengujian karakteristik TEG berbeban.....	77
Gambar 4.20 Skema pengujian direct charging dengan TEG.....	78
Gambar 4.21 Skema pengujian charging MPPT InC dengan TEG	79
Gambar 4.22 Besar rugi daya (PLS) pada konverter SEPIC	81
Gambar 4.23 Skema pengujian direct charging dengan power supply	82
Gambar 4.24 Grafik hasil pengujian direct charging dengan power supply	83
Gambar 4.25 Skema pengujian charging MPPT InC dengan power supply.....	84
Gambar 4.26 Grafik hasil pengujian charging MPPT InC power supply	85
Gambar 4.27 Perbandingan daya charging saat direct dan MPPT InC.....	85

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Waktu penelitian	25
Tabel 3.2 Datasheet TE-MOD-10W4V-40	30
Tabel 3.3 Spesifikasi DC/DC SEPIC konverter	35
Tabel 3.4 Parameter perancangan DC/DC SEPIC	39
Tabel 3.5 Spesifikasi baterai	43
Tabel 3.6 Data pengujian pengujian konverter tipe SEPIC	48
Tabel 3.7 Data pengujian TEG.....	49
Tabel 3.8 Data pengujian karakteristik TEG.....	50
Tabel 3.9 Data pengujian sistem TEG	51
Tabel 4.1 Data spesifikasi penyimpanan datalogger.....	53
Tabel 4.2 Pengujian tanpa beban tegangan 6 V	56
Tabel 4.3 Pengaruh <i>duty cycle</i> terhadap tegangan <i>output</i>	58
Tabel 4.4 Hasil Pengujian pengaruh perubahan <i>duty cycle</i> terhadap arus <i>output</i>	59
Tabel 4.5 Hasil pengujian pengaruh <i>duty cycle</i> terhadap daya <i>output</i>	60
Tabel 4.6 Data pengaruh <i>duty cycle</i> terhadap efisiensi	62
Tabel 4.7 Besar resistansi internal komponen konverter SEPIC	63
Tabel 4.8 <i>Power losses</i> dengan perubahan <i>duty cycle</i> pada beban 39 ohm	67
Tabel 4.9 Analisa <i>power losses</i> beban bervariasi pada <i>duty cycle</i> 50%.....	68
Tabel 4.10 Hasil pengujian MPPT dengan variasi beban	70
Tabel 4.11 Proses MPPT InC mencari titik daya maksimum (R 20.1 Ω).....	72
Tabel 4.12 Respon <i>duty cycle</i> pada MPPT InC.....	72
Tabel 4.13 Data perhitungan Rint TEG	75
Tabel 4.14 Data pengujian generator saat berbeban	77
Tabel 4.15 Hasil pengujian <i>direct charging</i> dengan TEG	79
Tabel 4.16 Hasil pengujian <i>charging</i> MPPT InC dengan TEG	80
Tabel 4.17 Data perbandingan daya <i>direct charging</i> dan MPPT InC.....	80
Tabel 4.18 Daya pengujian konverter saat <i>charging</i> dengan TEG	81
Tabel 4.19 Hasil pengujian <i>direct charging</i> dengan <i>power supply</i>	82

Tabel 4.20 Hasil pengujian *charging* MPPT InC dengan *power supply*84
Tabel 4.21 Data konverter saat proses *charging* dengan MPPT InC.....86
Tabel 4.22 Efisiensi dan *Power losses* konverter SEPIC.....87
Tabel 4.23 Parameter potensi dan target generator88



DAFTAR LAMPIRAN

A. Kalibrasi Sensor	95
B. Data Pengujian Tanpa Beban	96
C. Data Pengujian Dengan Beban	97
D. Perhitungan <i>Power losses</i>	100
E. <i>Datasheet</i> Tegangan Modul TEG.....	104
F. <i>Datasheet</i> Arus Modul TEG	105
G. <i>Datasheet</i> Efisiensi Modul TEG.....	106
H. <i>Listing</i> Program MPPT InC	107
I. Dokumentasi Penelitian	109

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan bagian yang tidak terpisahkan bagi kehidupan manusia saat ini. Terlebih didukung dengan perkembangan teknologi yang semakin maju mengharuskan manusia untuk senantiasa berinovasi untuk mengikuti segala dinamika perubahan atas perkembangan yang ada, salah satunya dengan memenuhi kebutuhan energi khususnya energi listrik. Hal ini dikarenakan, semakin berkembangnya kehidupan manusia maka kebutuhan energi listrik juga akan semakin meningkat. Namun peningkatan kebutuhan energi listrik yang tidak diimbangi dengan pemenuhan energi listrik tersebut menyebabkan berbagai permasalahan mengenai krisis energi listrik.

Berdasarkan proyeksi kebutuhan listrik penduduk indonesia hingga tahun 2024 nanti yakni mencapai 50.000 MW, namun hingga saat ini kebutuhan tersebut masih belum mencukupi sesuai proyeksi yang ada (kominfo.go.id, 2016). Sehingga untuk memenuhi kebutuhan listrik penduduk indonesia, maka pemerintah membangun mega proyek 35.000 MW, yang merupakan proyeksi PLN hingga tahun 2024. Namun melihat kondisi pada tahun 2015 yang masih sekitar 84 % rasio elektrifikasi, serta akan sangat mungkin nilai tersebut akan meningkat seiring bertambahnya penduduk maka indonesia perlu digencarkan pembangunan khususnya energi baru dan terbarukan (EBT) yang lebih ramah lingkungan. Sehingga diharapkan rasio elektrifikasi dapat meningkat hingga keseluruhan daerah di Indonesia bisa teralisi listrik.

Banyak sekali potensi energi baru dan terbarukan yang dapat dimanfaatkan masyarakat indonesia, mulai dari energi surya, biomassa, energi angin, air, panas bumi dan energi lainnya (ESDM, 2016). Energi tersebut tentunya sangat berpotensi apabila dimanfaatkan. Disamping itu, terdapat juga energi buangan atau limbah berupa energi panas dari kegiatan manusia yang hingga saat ini belum dimanfaatkan. Beberapa contoh kegiatan manusia yang dapat menghasilkan energi panas yaitu, pada bidang industri, transportasi, pertambangan, maupun bidang

lainnya. Data menunjukkan bahwa kegiatan manusia tersebut menghasilkan limbah panas hingga 66% (Dey, Prakash, Sikder, & Chattopadhyay, 2016). Sehingga dapat berpotensi untuk dimanfaatkan kembali untuk dijadikan sumber listrik. Salah satu pemanfaatannya yaitu dengan menggunakan generator termoelektrik (TEG). Energi buangan (*waste energy*) berupa panas akan dirubah menjadi listrik melalui perbedaan suhu oleh elemen termoelektrik.

Pada pembangkitan energi listriknya, TEG tidak menimbulkan polusi, sehingga lebih ramah lingkungan (Mamur & Ahiska, 2015). Karena alasan inilah, TEG semakin dikembangkan karena potensi yang cukup besar dan TEG merupakan sumber energi yang fleksible, karena bisa memanfaatkan semua jenis panas. Namun rendahnya efisiensi yang disebabkan perubahan temperatur yang dinamis menyebabkan energi yang dihasilkan juga berubah-ubah. Variasi beban dan perubahan temperatur dapat menyebabkan TEG tidak dapat menghasilkan daya secara maksimal pada suatu perbedaan temperatur (Laird & Lovatt, 2008). Sehingga diperlukan cara khusus agar TEG dapat menghasilkan energi lebih maksimal, salah satunya dengan menambahkan algoritma *maximum power point tracker* (MPPT) pada TEG. MPPT bekerja memanfaatkan DC/DC untuk mencari titik daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh TEG.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hayati Mamur dan Rahit Ahiska menggunakan DC/DC tipe *boost* converter dengan MPPT *Perturb and Observe* (PO) membuktikan bahwa penambahan algoritma MPPT dapat meningkatkan daya yang dihasilkan TEG (Mamur & Ahiska, 2015) Sedangkan pada penelitian ini akan digunakan DC/DC tipe SEPIC, karena dapat bekerja menaikkan dan menurunkan tegangan serta memiliki keluaran yang tidak *inverting* (Chiang & Shief, 2009). Algoritma yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *incremental conductance* (InC). Algoritma tersebut memiliki performa yang lebih baik dibanding dengan algoritma PO (William & Ramesh, 2013). MPPT InC dapat mencari titik daya maksimal lebih akurat dengan respon yang lebih cepat.

Sehingga diharapkan dengan diterapkan DC/DC tipe SEPIC dan algoritma MPPT InC dapat memaksimalkan daya keluaran yang dapat dihasilkan oleh TEG.

1.2 Rumusan Masalah

Dari permasalahan diatas, maka dapat disusun beberapa rumusan masalah :

1. Bagaimana membuat dan merancang konverter DC/DC tipe SEPIC serta menerapkan algoritma MPPT InC pada termoelektrik generator ?
2. Bagaimana performa konverter DC/DC tipe SEPIC yang telah dirancang serta diterapkan MPPT InC pada termoelektrik generator ?
3. Bagaimana performa TEG yang telah diterapkan MPPT InC serta ditinjau dari segi ekonomi?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan bahasan pada penelitian ini, maka dibuat batasan masalah agar pembahasan tidak meluas yang meliputi :

1. Konverter DC/DC tipe SEPIC dan algoritma MPPT tipe *Incremental conductance* (InC)
2. Penelitian difokuskan pada performa konverter dengan diterapkan MPPT InC
3. Tidak membahas sistem pendinginan TEG dan *charging control* pada baterai
4. Menggunakan rancangan generator hasil PKM pendanaan tahun 2015

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai oleh peneliti dalam penelitian ini adalah :

1. Dapat membuat konverter DC/DC SEPIC dan menerapkan algoritma MPPT
2. Mengetahui Performa DC/DC tipe SEPIC yang telah dirancang serta diterapkan MPPT InC pada TEG
3. Mengetahui performa TEG dengan MPPT InC serta kebutuhan biaya generator

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini, yaitu

1. Meningkatkan potensi penerapan TEG di Indonesia dengan memanfaatkan DC/DC *converter* serta penggunaan algoritma MPPT
2. Menjadi salah satu terobosan generator alternatif bersumber energi panas

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

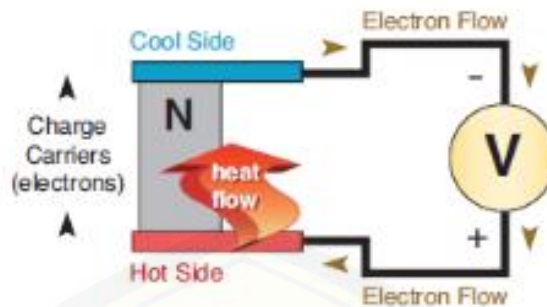
2.1 Generator Termoelektrik (TEG)

Pada tahun 1823 Seebeck melaporkan hasil eksperimannya yang mana sebuah kompas jarum bergeser jika ditempatkan disekitar sebuah sirkuit tertutup yang dibentuk dari dua buah konduktor, ketika sebuah *junction* diberi sebuah temperatur panas (Rowe, 1995). Pada tahun 1921 dikembangkan kembali dengan efisiensi termoelektrik kira kira mencapai 3%. Efisiensi tersebut berdasarkan nilai dari koefisien seebeck (σ) pada bahan yang digunakan pada termoelektrik.

TEG tersebut bisa menghasilkan listrik secara langsung tanpa merubah sistem yang ada, hanya dengan adanya perbedaan temperatur pada kedua sisi elemen, maka akan timbul beda potensial dan aliran arus pada sirkuit tertutupnya. Pada prinsip kerjanya, TEG tidak perlu ada bagian yang bergerak atau bersifat statis untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu kelemahan terbesar yaitu masih rendahnya efisiensi yang hanya kurang dari 10% (Rasit Ahiska, 2014). Namun rendahnya efisiensi ini tidak boleh diremehkan, mengingat energi yang dihasilkan berasal dari energi sisa yang dibuang kelingkuangan.

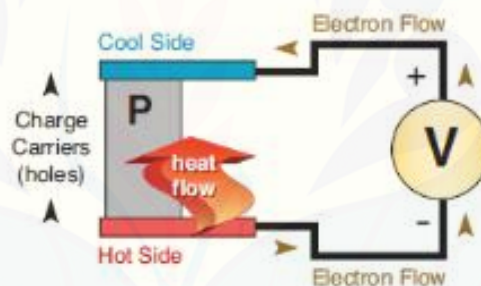
Walaupun TEG memiliki efisiensi yang masih sedikit (>10%) TEG masih dalam kategori piranti penghasil energi terbarukan (*renewable energy*) yang dibuat dari sebuah semikonduktor yang secara langsung dapat mengkonversikan perbedaan temperatur diantara kedua permukaan TEG (TEG) kedalam energi listrik (Mamur & Ahiska, 2015).

Elemen termoelektrik dibuat dengan menggunakan material semikonduktor, yang mana keduanya terbagi atas semikonduktor tipe N dan tipe P yang terhubung secara seri untuk menaikkan tegangan agar lebih besar (Shawwaf, 2010). Pada semikonduktor tipe N, energi panas akan bergerak dari sisi dingin membawa aliran elektron seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perpindahan elektron pada TEG dengan tipe N (Shawwaf, 2010)

Pada gambar tersebut, terlihat aliran elektron pada semikonduktor tipe N mengalir dari sisi dingin menuju sisi panas pada lintasan tertutup. Arah aliran elektron pada sistem tertutup tersebut akan menimbulkan *open loop voltage*. Sedangkan pada semikonduktor tipe P membawa elektron pada arah sebaliknya yaitu dari sisi panas menuju sisi dingin seperti terlihat pada gambar 2.2.

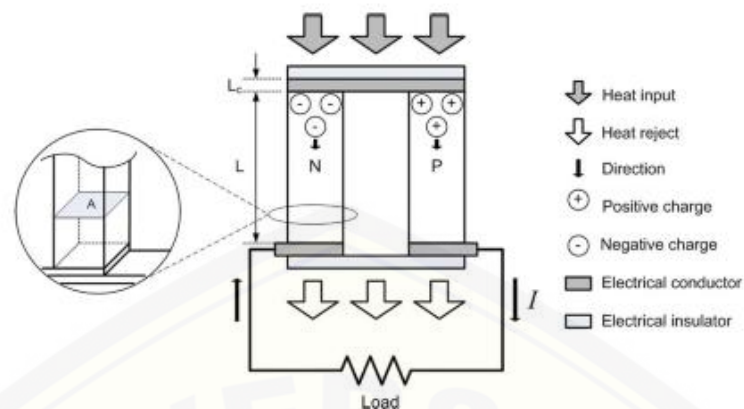


Gambar 2.2 Perpindahan elektron Pada TEG dengan tipe P (Shawwaf, 2010)

Pada gambar tersebut terlihat bahwa, adanya perbedaan temperatur mengakibatkan timbul aliran elektron sehingga pada ujung-ujung terminalnya timbul tegangan yang besarnya sesuai dengan persamaan dibawah ini :

$$V = \alpha(Th - Tc) \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana V adalah tegangan yang dihasilkan generator, α adalah besar koefisien seebeck, Th adalah temperatur pada sisi panas dan Tc adalah temperatur pada sisi dingin. Apabila dilakukan pengukuran baik tipe P dan tipe N didapat nilai tegangan *open circuit* sebesar 20mV dengan perbedaan temperatur sebesar 100°C. Sehingga untuk meningkatkan tegangan, semikonduktor tipe N dan tipe P dapat di hubungkan secara seri.



Gambar 2.3 Semikonduktor tipe N dan tipe P yang terhubung (Eakburanawat & Boonyaroonate, 2010)

Besar daya yang dihasilkan oleh generator tergantung pada jenis material semikonduktor yang dipakai. Pada persamaan (2.2) menunjukkan bahwa *figure of merit* adalah mempengaruhi konduktifitas listrik dan koefisien seebeck tetapi berkebalikan dengan konduktifitas dari material termoelektrik (H. B. Gao, 2015).

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana α adalah koefisien seebeck, σ , λ , ρ merupakan konduktifitas elektrik, konduktifitas termal, dan hambatan listrik. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien Seebeck yang tinggi dan konduktifitas termal serta rendah hambatan sangat diinginkan agar dapat mengasilkan elemen dengan daya yang besar (Shawwaf, 2010). Sedangkan untuk mengetahui Besar Efisiensi yang dihasilkan oleh generator dapat dicari dengan persamaan berikut ini :

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_c / T_h} \dots \dots \dots (2.3)$$

- Dimana
- Th = Suhu sisi dingin ;
 - Tc = Suhu sisi panas;
 - Zt = Dimensi figur merit ($zT = \alpha^2 \sigma T / \kappa$) (BiTe = 0.222) ;
 - η = efisiensi

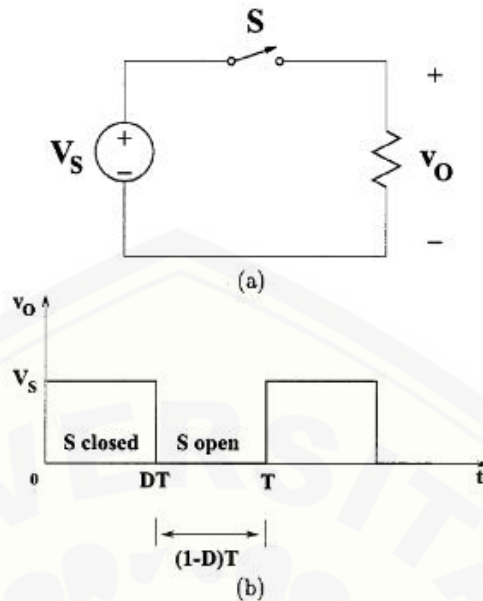
2.2 DC – DC Converter

Konverter DC-DC berfungsi untuk mengkonversikan daya listrik searah (DC) ke bentuk daya listrik DC lainnya yang terkontrol arus, atau tegangan, atau keduanya. Tujuan yang lain dari sebuah DC/DC konverter adalah penyuplai tegangan DC konstan untuk beban resistif dari sebuah sumber yang berubah-ubah yang mana tegangan DC didapat dari penyearahan tegangan pada sebuah tegangan AC yang dirubah magnitudnya sehingga teganan menjadi DC (Irwin, 2002). Tegangan keluaran dari DC/DC dapat dipatur sesuai dengan keinginan kita dengan menggunakan konsep *switching*. Dimana DC/DC konverter dibagi menjadi dua tipe utama yaitu *hard-switching pulse width modulation (PWM) converter* dan *resonant and soft-switching converters* (Rashid, 2001). Pada jenis PWM terdapat 5 rangkaian dasar konverter DC-DC non-isolasi yaitu DC *choppers*, *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk*, dan SEPIC. Keempat tipe dari jenis PWM tersebut memiliki permasalahan utama yaitu pada proses *switching* dari komponen elektronika daya. Hal ini menimbulkan *losses* pada masing-masing komponen.

2.2.1 DC Chopper

Pada konverter jenis DC *Chopper* merupakan konverter yang dapat menurunkan tegangan atau *step down*. Betuk rangkaian terlihat pada gambar 2.4 a. dimana sumber dc terhubung secara langsung dengan saklar terkontrol, kemudian dihubungkan langsung pada beban resistif. Saklar terkontrol dapat berupa MOSFETs, IGBTs, MCTs, BJT, atau juga GTOs. Saklar terkontrol tersebut dikontrol atau dikendalikan oleh *duty Ratio D* yang diartikan sebagai rasio saat saklar dalam keadaan *off* dan saklar dalam keadaan *on*. Terlihat pada gambar 2.4 b dimana perbandingan antara saklar saat *on* dan *off* pada frekuensi konstan dengan persamaan (4) berikut :

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{of}} = \frac{t_{on}}{T} \dots\dots\dots(2.4)$$



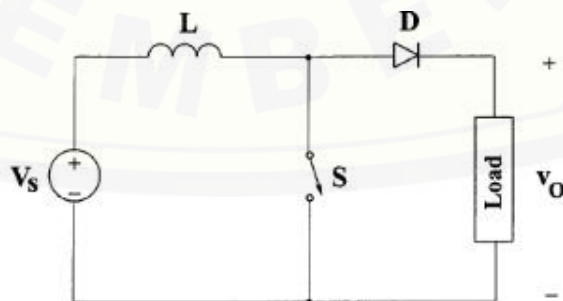
(a) Diagram circuit; (b) Bentuk gelombang keluaran

Gambar 2.4 DC Chopper dengan beban resistif: (Rashid, 2001)

Dimana $T = 1/f$ merupakan periode dari frekuensi f . dan didapat rata rata nilai tegangan keluaran yaitu pada persamaan berikut ini :

$$V_o = DV_s \dots\dots\dots(2.5)$$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa kita dapat mengatur besar tegangan keluaran dengan mengatur besar *duty cycle* (D) pada komponen elektronika daya. DC *chopper* dapat menghasilkan tegangan *output* puncak yang memiliki nilai yang lebih besar dari tegangan masukan. Namun harus menyertai komponen tambahan layaknya *step up converter*. Seperti penggunaan induktor dan kapasitor.

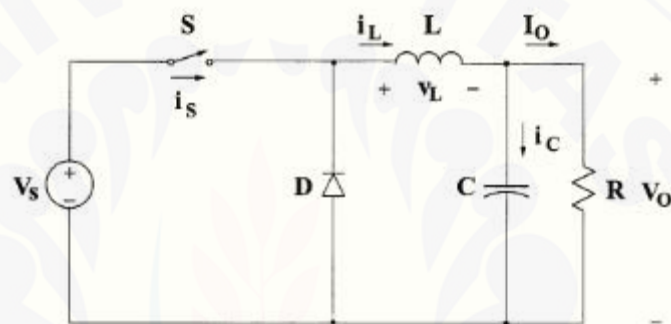


Gambar 2.5 Step up DC chopper (Rashid, 2001)

2.2.2 Topologi Penurun Tegangan (*Buck converter*)

DC/DC *buck* konverter merupakan topologi dasar dari keseluruhan jenis konverter yang ada. Pada konverter ini tegangan keluaran akan diatur sedemikian rupa sehingga memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai tegangan masukan. Besar tegangan keluaran juga dikontrol melalui *duty cycle* yang dikirim menuju komponen elektronika daya.

Rangkaian *buck* konverter pada gambar 2.6 terdiri atas sebuah filter induktor L, filter kapasitor C, beban resistif R serta komponen elektronika daya yang berlaku sebagai saklar terkontrol (Rashid, 2001).



Gambar 2.6 Rangkaian konverter DC-DC tipe *buck* (Rashid, 2001)

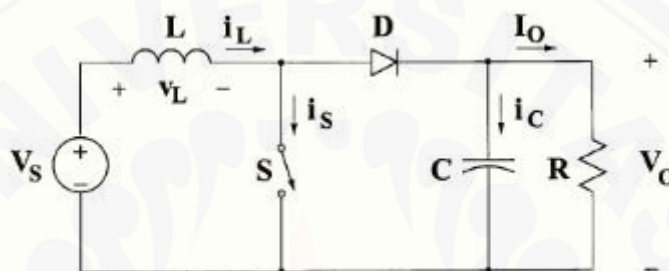
Pada konverter ini berlaku dua kondisi yaitu *continuous-conduction mode* (CCM) dan *discontinuous-conduction mode* (DCM). Pada mode CCM arus yang melalui induktor selalu diatas nilai nol atau tidak pernah bernilai nol. Namun ketika nilai rata-rata bernilai rendah, dan frekuensi f juga rendah maka *buck* konverter berlaku DCM. Pada mode CCM lebih diutamakan untuk efisien tinggi sedangkan DCM diutamakan untuk aplikasi kontrol karena akan ada kemungkinan nilai nol.

CCM merupakan operasi yang terjadi ketika arus yang melewati induktor pada sirkuit atau rangkaian konverter memiliki nilai yang kontinyu, yang mana berarti arus pada induktor selalu lebih besar dari nol. DCM merupakan operasi yang terjadi ketika nilai dari arus beban lebih rendah dari pada nol pada periode yang telah diberikan pada saklar (Irwin, 2002).

2.2.3 Topologi Penaik Tegangan (*Boost converter*)

Boost converter berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan masukannya, atau biasa disebut dengan konverter penaik tegangan. Konverter ini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga surya dan turbin angin.

Rangkaian *boost converter* terlihat pada gambar 2.7 dimana memiliki komponen utama yaitu saklar kontrol (MOSFETs), dioda D, filter kapasitor C, *boost inductor* L, dan beban resistif R.

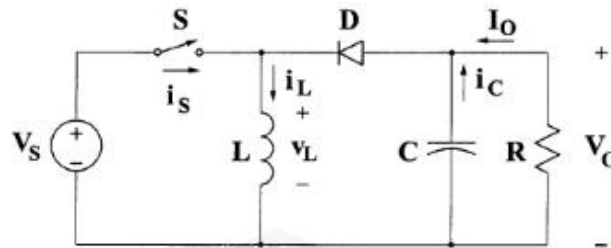


Gambar 2.7 Rangkaian konverter DC-DC tipe *boost* (Rashid, 2001)

Sama dengan konverter daya yang lainnya besar peningkatan tegangan oleh rangkaian *boost converter* tergantung berapa besar *duty cycle* yang bekerja pada saklar terkontrol. Besar gelombang PWM berpengaruh terhadap kenaikan tegangan masukan. Sehingga besar tegangan keluaran dipengaruhi oleh besar *duty cycle* yang diterima oleh saklar terkontrol.

2.2.4 Topologi Penurun dan Penaik Tegangan (*Buck-boost converter*)

Konverter *buck-boost* dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah atau lebih tinggi daripada sumbernya. Rangkaian konverter ini dapat dilihat pada gambar 2.8. komponen utama pada rangkaian *Buck-boost converter* yaitu saklar terkontrol S, induktor L, dioda D, filter kapasitor C, dan beban R. Namun rangkaian ini menyebabkan tegangan keluaran bersifat *inverting*, atau berkebalikan dengan tegangan masukan walaupun tegangan keluaran akan bernilai diatas maupun dibawah tegangan masukan. Besar tegangan keluaran juga tergantung berapa rasio *duty cycle* yang dikirimkan menuju saklar terkontrol.



Gambar 2.8 Rangkaian konverter DC-DC tipe *buck-boost* (Rashid, 2001)

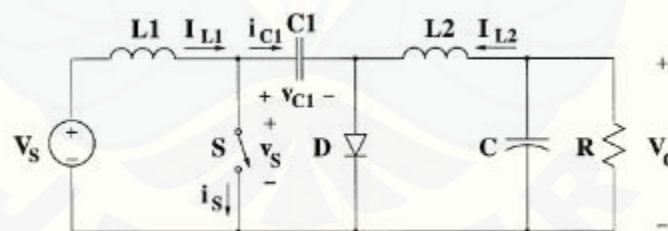
Untuk mendesain induktor pada tipe ini atau batas antara DCM maupun CCM dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$L_b = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \dots\dots\dots(2.6)$$

Pesamaan tersebut akan menghasilkan nilai minimal induktor yang dibutuhkan untuk mendesain sebuah DC/DC *buck boost converter*.

2.2.5 Topologi CUK

Seperti halnya tipe *buck-boost*, konverter DC-DC topologi ini juga dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih kecil ataupun lebih besar daripada sumber tegangan. Rangkaian dari konverter dc-dc ini diperlihatkan pada gambar 2.9.



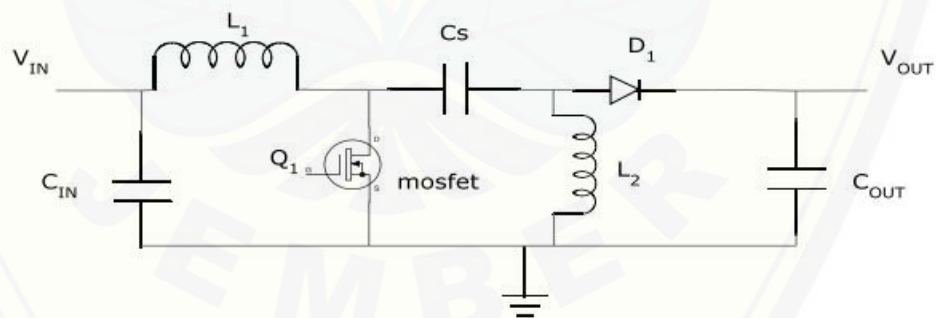
Gambar 2.9 Konverter DC-DC tipe CUK (Rashid, 2001)

Dimana memiliki beberapa komponen tambahan yaitu *input* induktor L1, saklar terkontrol S, kapasitor transfer daya C₁, dioda D, induktor sebagai filter L2, filter kapasitor C dan beban resistor R. dari beberapa jenis komponen sebelumnya, pada komponen jenis CUK ini memiliki keuntungan yaitu memiliki arus yang kontinyu pada kedua masukan dan keluaran dari konverter itu sendiri. Namun disamping memiliki kelebihan juga memiliki kekurangan yaitu memiliki nilai komponen reaktif yang cukup tinggi, dan arus yang tinggi membuat kerja saklar semakin berat, pada dioda, kapasitor C₁.

2.2.6 Topologi SEPIC

SEPIC (*Single Ended Primary Inductor Converter*) merupakan salah satu jenis konverter yang dapat menjadi *step up* maupun *step down* dengan cara mengatur *duty cycle* pada kaki gate MOSFET. Untuk *duty cycle* diatas 0.5 maka konverter bekerja sebagai *step up* sedangkan ketika *duty cycle* dibawah 0.5 maka konverter berlaku sebagai *step down*. Dari keseluruhan jenis konverter semua karakteristik dimiliki oleh SEPIC. Desain yang berbeda terdapat pada komponen aktif maupun pasif. Dengan keluaran *non inverting*, *low equivalent series resistance* (ESR) dari kapasitor yang di kopel sehingga minim *ripple* dan mencegah pemanasan berkebih pada komponen karena bekerja terlalu keras. Sehingga memiliki jangkauan yang cukup luas dalam pengoperasiannya.

SEPIC dibuat atas dasar pengembangan konverter jenis sebelumnya, yakni *buck*, *boost*, *buck-boost*, dan CUK. Konverter topologi ini adalah perbaikan dari topologi konverter DC-DC tipe cuk. SEPIC *converter* merupakan *non-inverting* dc-dc *converter* dan dapat menghasilkan tegangan diatas maupun dibawah dari tegangan masukan. Masukan arus adalah *non-pulsating*, tetapi arus keluaran berupa *pulsating*. Nama SEPIC merupakan singkatan dari *single-ended primary inductance converter* (Eakburanawat & Boonyaroonate, 2010)



Gambar 2.10 Konverter DC-DC tipe SEPIC (Ranjan & Kumar, 2013)

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa SEPIC memiliki komponen utaman yaitu induktor1 (L_1) dan induktor2 (L_2), kapasitor kopling (C_s), dioda (D), kapasitor *output* (C_{out}).

2.3 SEPIC Konverter

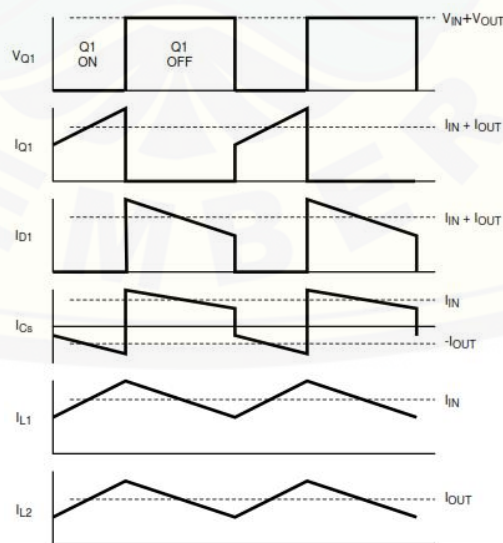
2.3.1 Cara Kerja DC/DC SEPIC

SEPIC konverter bekerja seperti *buck-boost* konverter namun bekerja dengan keluaran yang tidak inverting layaknya *buck-boost converter*. Mode operasi yang dimanfaatkan pada konverter jenis SEPIC yaitu mode CCM (*Continuous Conduction Mode*). Yaitu kondisi yang terjadi ketika arus yang melalui induktor L1 tidak pernah bernilai nol. Pada saat kondisi *steady state*, rata-rata tegangan pada kapasitor adalah sama dengan tegangan masukan (V_{in}) sedangkan pada kapasitor C_s arus diblok sehingga arus yang melewatinya sama dengan nol. Sedangkan L2 bertindak sebagai sumber arus beban. Sehingga tegangan total dapat dirumuskan dengan nilai :

$$V_{in} = V_{L1} + V_{Cs} + V_{L2} \dots \dots \dots (2.7)$$

Prinsip kerja dari SEPIC dibagi menjadi dua yaitu ketika MOSFET on dan ketika MOSFET *off*. Dimana terlihat pada gambar 2.11 saat Q1 swtich *off*, arus $I_{Cs} =$ arus I_{L1} , seperti induktor tidak akan membolehkan arus berubah. Arus L2 akan kontinyu ke arah negatif. Sehingga faktanya tidak pernah bernilai *reverse* dapat terlihat dari diagram tersebut bahwa arus L2 negatif akan menambah arus L1. Untuk ditingkatkan dan dikirimkan ke beban berdasar hukum kirchoff

$$I_{D1} = I_{Cs} - I_{L2} \dots \dots \dots (2.8)$$

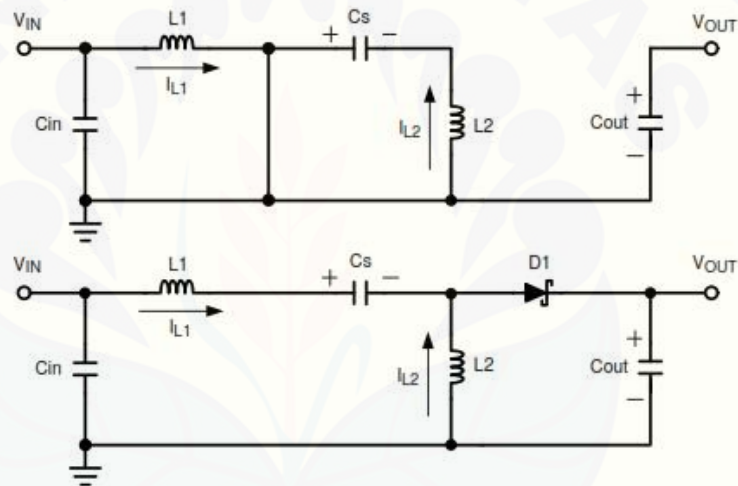


Gambar 2.11 Gelombang *switching* pada SEPIC (Zhang, 2013)

Sehingga, saat Q1 *Off*, maka daya dikirimkan ke beban dari kedua induktor L1 dan L2., kapasitor kopling (cs) di *charger* L1. Selama *cycle off* dan selanjutnya akan di *charge* lagi oleh L2 selama *on cycle*. Induktor L1 dan saklar Q1 menyebabkan SEPIC menjadi *boost* konverter, yang dapat meningkatkan tegangan keluaran (VQ1) sehingga lebih besar dari tegangan masukan Vin. Karena tegangan cs = Vin maka Vout memiliki nilai sesuai persamaan 2.9.

$$V_{out} = V_{Q1} - V_{in} \dots \dots \dots (2.9)$$

Jika VQ1 lebih rendah dari Vin dan Vout lebih rendah dari pada tegangan masukan. Jika VQ1 akan lebih tinggi dari Vin, tegangan keluaran akan lebih besar dari tegangan masukan.



Gambar 2.12 Cara kerja DC/DC tipe SEPIC (Zhang, 2013)

Saat MOSFET *conduct* (*turn on*) maka MOSFET tidak akan mengalirkan tegangan sumber atau sama dengan nol, begitu juga sebaliknya saat MOSFET tidak terhubung maka yang terjadi adalah tegangan sumber melewati MOSFET. Sehingga berdasarkan *on-off* MOSFET gelombang kotak diperoleh dan dialirkan ke beban/sumber, dan di sebutkan dengan tegangan dari MOSFET



Gambar 2.13 Gelombang *duty cycle* (Ranjan & Kumar, 2013)

Ketika MOSFET *turn on*, L1 mulai mengisi sehingga Arus induktor dan MOSFET meningkat, ketika MOSFET *turn off* maka tidak ada arus yang melewatinya. Selama MOSFET kondisi *turn on* maka tidak ada arus yang melewatinya dan tegangan pada diode adalah negatif ketika MOSFET *turn off*, maka kapasitor coupling akan memulai *charge*, dan induktor mulai *discharge* ketika kapasitor mulai *charging* maka arus menuju capasitor mulai turun dan ketika *discharge*, arus *charging* semakin meningkat. Jadi saat T_{on} , maka kapasitor kopleng akan mulai *discharge* melalui induktor, dan arus dikapasitor meningkat, tetapi dengan arah sebaliknya, sehingga arusnya negatif. Selama T_{off} kapasitor mulai *charge* dan arus maju. Ketika MOSFET *turn on*, I1 akan mulai *charging* melalui Q sehingga arus meningkat pada MOSFET dan L1 dan juga sebaliknya, saat MOSFET *turn off* maka L1 mulai menurun arus kedua induktor sama seperti kedua induktor, *charging* dan *discharging* secara terus menerus.

2.3.2 Desain Konverter

Untuk mendesain sebuah induktor, banyak parameter yang dibutuhkan agar perancangan menghasilkan hasil rancangan yang sesuai target. Berikut langkah dalam mendesain SEPIC (Zhang, 2013):

a. Menentukan *duty cycle*

langkah selanjutnya yaitu menentukan besar *duty cycle* estimasi awal pada perancangan DC/DC *converter*.

$$D = \frac{V_{out} + V_D}{V_{in} + V_{out} + V_D} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$D_{max} = \frac{V_{out} + V_D}{V_{in (Min)} + V_{out} + V_D} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$D_{min} = \frac{V_{out} + V_D}{V_{in (Max)} + V_{out} + V_D} \dots \dots \dots (2.12)$$

Persamaan diatas digunakan untuk menentukan besar *duty cycle* estimasi berdasarkan data spesifikasi DC/DC *converter* yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk *duty cycle* minimum didapatkan dengan *input* maksimum, dengan $V_D = 0.5 \text{ V}$

b. Menentukan Nilai Induktor

Setelah didapatkan besar *duty cycle* , maka langkah selanjutnya yaitu mencari nilai *ripple current* pada induktor dengan persamaan 2.13 dan persamaan 2.14.

$$\Delta IL = I_{out} \times \frac{V_{out}}{V_{in (Min)}} \times 40\% \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana ΔIL merupakan arus *ripple* pada induktor. Kemudian menentukan besar nilai induktor berdasarkan *ripple current* dengan persamaan 2.14

$$L1 = L2 = \frac{V_{in (Min)} \times D (Max)}{\Delta IL \times F_{sw}} \dots \dots \dots (2.14)$$

Kemudian langkah selanjutnya yaitu menghitung *peak current* pada induktor dengan persamaan 2.15 dan 2.16 untuk induktor yang ke dua.

$$IL1 (peak) = I_{out} \times \frac{V_{out} + VD}{V_{in (Min)}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$IL2 (Peak) = I_{out} \times \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) \dots \dots \dots (2.16)$$

Namun jika induktor dibuat dengan menggunakan satu inti maka perancangan menggunakan persamaan 2.17

$$L1 = L2 = \frac{L}{2} = \frac{V_{in} \times D_{min}}{2 \times \Delta IL \times f} \times D_{max} \dots \dots \dots (2.17)$$

c. Menentukan MOSFET

Menggunakan parameter tegangan *threshold* sehingga didapat tegangan maksimal pada MOSFET adalah $V_{in} + V_{out}$. Sedangkan arus maksimal pada MOSFET adalah $L1 (peak) + IL2 (peak)$

Sedangkan arus RMS yang melewati MOSFET sesuai dengan persamaan 2.18

$$IQ1 (rms) = I_{out} \sqrt{\frac{(V_{out} + V_{in (Min)} + VD) \times (V_{out} + VD)}{V_{in}^2 \min}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Untuk daya disipasi pada MOSFET ditentukan dari persamaan 2.19

$$PQ1 = IQ1^2 \times R_{ds (on)} \times D_{max} \times (V_{in (Min)} + V_{out}) \times IQ1 (peak) \times \frac{Q_{GD} \times f}{I_g} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dengan I_g adalah arus gate, R_{ds} adalah nilai operasi dari *datasheet*.

d. Pemilihan dioda

Nilai *current peak* dioda adalah sama dengan nilai $IQ1 (peak)$. Dan minimal tegangan *reverse* pada dioda adalah pada persamaan 2.20.

$$V_{RD1} = V_{in (Max)} + V_{out (Max)} \dots \dots \dots (2.20)$$

e. Pemilihan kapasitor *coupling*

Setelah didapatkan nilai besar induktor dan MOSFET, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan besar nilai kapasitor yang digunakan. Untuk menentukan nilai dari kapasitor, yaitu dengan menggunakan persamaan 2.21 untuk kapasitor *coupling* (C_s) dan persamaan 2.22 untuk kapasitor *output* (I_{Cout})

$$I_{C_s} (rms) = I_{out} \times \sqrt{\frac{V_{out}+V_D}{V_{in} Min}} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$I_{Cout} = I_{out} \times \sqrt{\frac{V_{out}+V_D}{V_{in} Min}} \dots\dots\dots(2.22)$$

Sedangkan untuk menentukan *ripple* tegangan pada kapasitor C_s menggunakan persamaan 2.23

$$\Delta V_{C_s} = \frac{I_{out} \times D_{max}}{C_s \times f} \dots\dots\dots(2.23)$$

f. Pemilihan nilai kapasitor *output*

Sebelum menentukan besar kapasitor *output* yang akan digunakan terlebih menentukan besar arus rms *output* kapasitor yang akan digunakan dengan menggunakan persamaan 2.24

$$I_{Cout} (rms) = I_{out} \times \sqrt{\frac{V_{Out}+V_D}{V_{In} (Min)}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Sehingga untuk menentukan besar kapasitor yang digunakan dipakai persamaan ESR (*Equivalent Series Resistance*) yang terdapat pada persamaan 2.25 dan 2.26.

$$ESR \leq \frac{V_{ripple} \times 0.5}{I_{L1} (peak) + I_{L2} (peak)} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$C_{out} \geq \frac{I_{out} \times D}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$I_{Cin} (rms) = \frac{\Delta I_L}{\sqrt{12}} \dots\dots\dots(2.27)$$

$I_{cin} (rms)$ merupakan nilai arus masukan untuk kapasitor *input* Setelah dilakukan perancangan konverter jenis SEPIC.

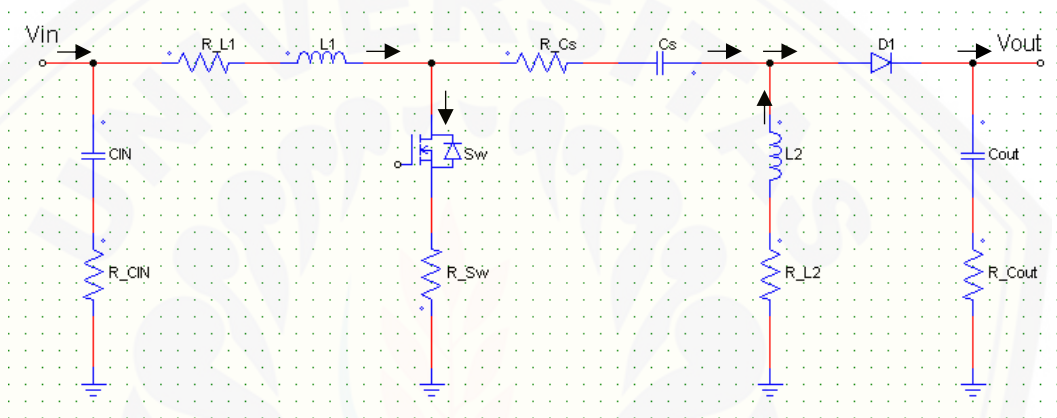
Setelah mengetahui besar nilai induktor maka tahap selanjutnya yaitu menghitung jumlah lilitan yang dipakai dengan menggunakan persamaan

$$N = 100 \sqrt{\frac{Nilai L (uH)}{AL (\frac{uH}{100}turn)}} \dots\dots\dots(2.28)$$

Pada persamaan 2.28 merupakan persamaan mencari jumlah lilitan. Dimana N total lilitan pada toroid; L (nilai induktor), AL besar induktansi per 100 putaran.

2.3.2 Power losses Dan Efisiensi Konverter SEPIC

Pada proses kerjanya, konverter bekerja atas pensaklaran MOSFET. Sehingga akan menghasilkan rugi-rugi (Vorperian, 2006). Begitu juga pada rangkaian konverter tipe SEPIC. Pada rangkaian utama konverter tipe SEPIC (gambar 2.14) memiliki beberapa komponen parasit (menghasilkan losses).



Gambar 2.14 Rangkaian SEPIC dengan rugi-rugi dari komponen tahanan dalam

Diantara komponen tahanan parasit tersebut yaitu R_{L1} , R_{L2} , R_{SW} , R_{Cs} , R_{Cout} , R_{Cin} , R_D . Komponen tersebut akan menghasilkan rugi daya (*power losses*). *Power losses (PLS)* digunakan untuk memperkerikan besar rugi daya akibat komponen konverter yang akan digunakan untuk mengetahui efisiensi dari konverter yang telah dibuat. Sehingga dapat menjadi acuan komponen yang tepat untuk konverter tipe SEPIC yang dipakai. *PLS* adalah total rugi daya pada keseluruhan komponen konverter yaitu $PLS = P_{cond} + P_{sw} + P_D + P_{Cs} + Pr_{L1} + Pr_{L2} + P_{cin} + P_{Cout}$. Untuk menghitung efisiensi dari rangkaian yang telah dibuat yaitu

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + PLS} \cdot 100\% \dots\dots\dots(2.29)$$

Untuk mengetahui besar nilai rugi yang dihasilkan oleh komponen aktif MOSFET yaitu dengan cara persamaan berikut ini (P_{rDS} merupakan besar daya yang dihasilkan oleh hambatan dalam MOSFET)

$$P_{cond} = r_{DS} \cdot I_{L1rms}^2 = \frac{D r_{DS} I_o^2}{P_o + PLS} = \frac{D r_{DS} P_o}{(1-D)^2 \cdot RL} \dots\dots\dots(2.30)$$

Untuk menghitung rugi-rugi *switching* (P_{sw}), dapat diperoleh dari persamaan berikut, (C_o kapasitansi MOSFET; V_s (teg sumber); V_o (teg output); F_s (frekuensi *switching*)

$$P_{sw} = F_s \cdot C_o \cdot V_s m^2 = F_s \cdot C_o (V_s + V_o)^2 \dots\dots\dots(2.31)$$

Dengan persamaan tersebut, maka didapat total daya disipasi pada MOSFET sebagai berikut,

$$P_{mosfet} = P_{cond} + P_{sw} = \frac{D r_{DS} I_o^2}{(1-D)^2} + \frac{1}{2} F_s \cdot C_o (V_s + V_o)^2 \dots\dots\dots(2.32)$$

Kemudian, untuk rugi pada dioda didapat dari persamaan berikut, (R_f merupakan hambatan dalam dioda saat bias maju dan P_{vf} *power losses* saat forward)

$$P_D = P_{VF} + P_{RF} = V_f I_o + \frac{R_f I_o^2}{1-D} = \left[\frac{V_f}{V_o} + \frac{R_f}{(1-D)R_f} \right] P_o \dots\dots\dots(2.32)$$

Rugi-rugi pada induktor dapat diperoleh dari persamaan berikut, (r_L merupakan hambatan dalam induktor)

$$P_{rL1} = r_L I_{in_{Lrms}}^2 \dots\dots\dots(2.33)$$

$$P_{rL2} = r_{L2} I_{out_{Lrms}}^2 \dots\dots\dots(2.34)$$

Untuk rugi-rugi pada kapasitor C_s dengan r_{cs} hambatan dalam kapasitor C_s

$$P_{Cs} = r_{Cs} I_{C_{Lrms}}^2 \dots\dots\dots(2.35)$$

Apabila menggunakan C_{in} maka *power losses* sebagai berikut, (r_{LCin} merupakan tahanan dalam kapasitor *input*)

$$P_{cin} = r_{LCin} I_{in_{Lrms}}^2 \dots\dots\dots(2.36)$$

Apabila menggunakan C_{out} maka *power losses* sebagai berikut, (r_{LCout} merupakan tahanan dalam kapasitor *output*)

$$P_{Cout} = r_{LCout} I_{in_{Lrms}}^2 \dots\dots\dots(2.37)$$

Dari beberapa persamaan tersebut maka didapat nilai *power losses* total yaitu

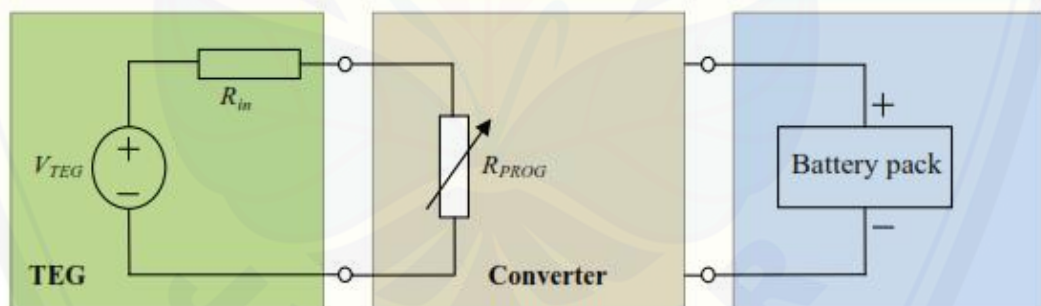
$$PLS = P_{mosfet} + P_D + P_{rL1} + P_{rL2} + P_{Cs} + P_{cin} + P_{Cout} \dots\dots\dots(2.38)$$

Besar daya komponen sangat dipengaruhi oleh komponen yang digunakan. sehingga pemilihan besar komponen sangat mempengaruhi besar *power losses* yang dihasilkan kompoenen tersebut.

2.3 Maximum Power Point Tracker (MPPT)

Daya yang dihasilkan oleh TEG tergantung pada jenis material elemen TEG dan perbedaan suhu antara sisi dingin dan sisi panas yang diterima oleh TEG. *Maximum power point tracker* (MPPT) digunakan untuk mencari titik daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh TEG dalam sistem yang telah dibuat (freeman, 2010). MPPT banyak diterapkan pada energi terbarukan seperti energi angin, energi surya, maupun energi lain yang memiliki potensi diterapkan MPPT. Dengan diterapkan MPPT sumber energi akan lebih dimaksimalkan daya yang dihasilkannya, sehingga lebih maksimal. MPPT bekerja secara otomatis dengan mengontrol konverter atau DC/DC melalui parameter-parameter masukan yang diterimanya sebagai *input* untuk menentukan besar respon yang dibutuhkan untuk mencapai daya maksimum.

Penerapan MPPT pada TEG menyesuaikan beban virtual pada modul termoelektrik atau beban internal pada modul dengan cara merubah *duty cycle* pada modul konverter (Montecucco, 2015). Algoritma MPPT memiliki prinsip kerja yang ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Karakteristik dari modul TEG (Mamur & Ahiska, 2015)

Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa konverter berfungsi sebagai resistor variabel yang dapat berubah nilainya. Perubahan besar nilai tergantung besar *duty cycle* yang diterimanya. Fungsi perubahan resistansi yakni mengkondisikan agar total beban dan r_{prog} (R_{par}) memiliki nilai yang mendekati R_{in_TEG} . Ketika $R_{in_TEG}=R_{par}$ maka kondisi tersebut merupakan kondisi maksimum atau TEG sudah mencapai titik daya maksimum.

Titik daya maksimum yang dihasilkan TEG akan berubah-ubah tiap waktu. Yaitu tergantung pada perbedaan temperatur pada sisi dingin dan sisi panas. Besar

tegangan dan arus juga akan berubah menyesuaikan besar perbedaan temperatur pada modul TEG yang digunakan. Sehingga algoritma MPPT akan menyesuaikan dan mencari titik daya maksimum dari perubahan beda temperatur.

Penelitian mengenai penggunaan MPPT seringkali pada sel surya, dan secara luas bisa diaplikasikan pada TEG. Ada 3 jenis metode yang sering digunakan, yaitu *perturb and observe* (P&O), *incremental conductance* (InC), dan *Fractional open/short-circuit voltage/current*. P&O dan InC merupakan metode *Hill Climbing*. Metode *hill climbing* memiliki arti bahwa algoritma akan mencari titik daya maksimum dengan cara menjejaki daya pada daerah operasi titik ke titik lainnya dan mengukur daya pada titik tersebut. Kemudian apabila daya mencapai titik yang paling besar, maka algoritma akan menjaga pada titik operasi tersebut. Perbedaan keduanya terletak pada capaian menuju maksimum *power point*. Yang mana akan berubah ubah disekitar titik tersebut (Ian Laird, 2013).

2.3.1 *Incremental conductance* (InC)

Algoritma *Incremental conductance* merupakan salah satu metode MPP tracking. Algoritma ini menggunakan pengukuran *incremental* pada perubahan konduktansi pada generator, baik termoelektrik maupun sel surya. Dengan membandingkan pengukuran *incremental*, dapat diketahui perubahan perubahan daya tegangan maupun arus yang disebabkan perubahan temperatur pada TEG (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013).

Incremental conductance didefinisikan sebagai (dI_{tg} / dV_{tg}) . Dengan mendapatkan nilai konduktansi nyata dari modul termoelektrik, maka dapat diketahui MPP (titik maksimum) titik operasi berada. InC dapat mencari lebih cepat terhadap peningkatan dan penurunan tingkat kecerahan sehingga memiliki akurasi yang lebih baik dari pada P&O. Namun kelemahannya yaitu peningkatan yang kompleks ketika dibandingkan dengan P&O.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I}{V} \dots\dots\dots(2.29)$$

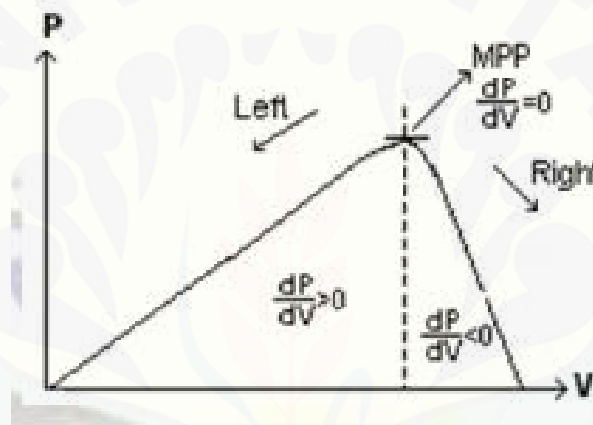
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \dots\dots\dots(2.30)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I}{V} \dots\dots\dots(2.31)$$

Persamaan (2.29) merupakan proses membandingkan nilai perubahan arus dan perubahan tegangan terhadap nilai arus dan tegangan yang ditentukan. Sedangkan persamaan (2.30, 2.31) merupakan perbandingan ketika nilai tidak sama, sehingga dapat bernilai positif maupun negatif sesuai dengan besar nilai arus dan tegangan.

$$\frac{dP}{dV} = 1 + V\left(\frac{dI}{dV}\right) \dots \dots \dots (2.32)$$

Sehingga didapatkan persamaan (2.32) yang merupakan nilai dari perubahan daya terhadap tegangan. Nilai tersebut akan digunakan untuk mencari titik maksimum dari TEG (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013).

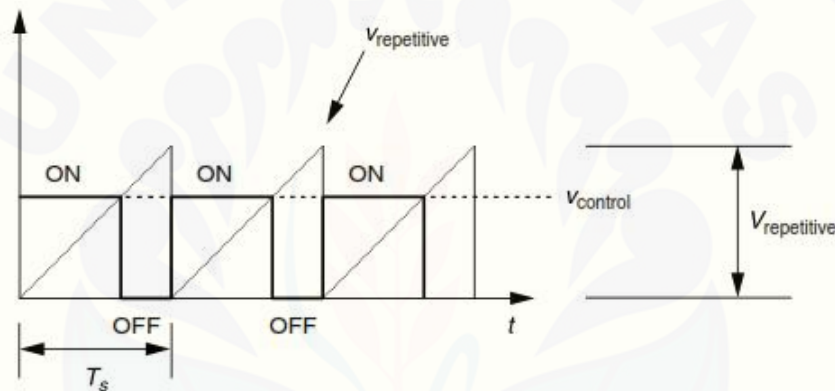


Gambar 2.16 Grafik *incremental conductance* (Lokanadham & Bhaskar, 2012)

Grafik 2.16 menunjukkan kondisi kerja algoritma MPPT untuk mencari nilai titik MPP pada tiap kondisi. Ketika nilai *conductance* bernilai nol, maka algoritma akan mempertahankan posisi pada titik MPP. Namun ketika bernilai lebih dari nol, maka algoritma akan mendeteksi nilai menjauhi ke kiri MPP, begitu juga ketika nilai *conductance* bernilai kurang dari nol maka algoritma akan mendeteksi nilai menjauhi ke kanan MPP. Sehingga sistem akan mengontrol tegangan referensi agar dapat menjaga daya pada titik maksimum. Yaitu dengan cara mengatur besar PWM.

2.3.2 PWM (*Pulse Width Modulation*)

Pulse Width Modulation (PWM) adalah suatu jalan atau cara yang efisien dalam menyediakan sejumlah tegangan listrik antara kondisi “*high*” dan “*low*”. Saklar tegangan sederhana dengan sumber tegangan tipikal hana menyediakan tegangan penuh, ketika saklar dihidupkan. PWM adalah teknik mendapatkan sinyal kotak diantara on dan *off*. Teknik ini digunakan untuk mengontrol saklat otomatis seperti MOSFET. Hal yang berpengaruh adalah besar *duty cycle* . *Duty cylce* merupakan perbandingan waktu on dan waktu *off*. Besar *duty cycle* berpengaruh terhadap pensaklaran dari MOSFET. Gambar 2.17 merupakan kerja dari sinyal PWM.

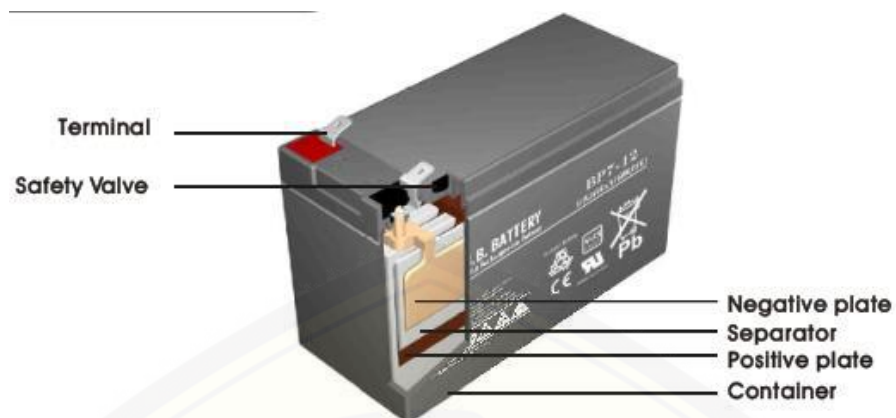


Gambar 2.17 Kerja PWM (Irwin, 2002)

Pada penelitian ini sinyal PWM digunakan sebagai kontrol MOSFET pada konverter tipe SEPIC. Besar *duty cycle* yang digunakan untuk mengontrol konverter tergantung dari kontrol algoritma MPPT yang digunakan.

2.4 Baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA)

Baterai VRLA merupakan salah satu jenis baterai yang memiliki kelebihan yaitu tidak memerlukan perawatan khusus, seperti baterai aki pada umumnya. Hal ini dikarenakan kontruksi yang secara fisik tertutup oleh lapisan plastik kuat, sehingga tidak ada kebocoran cairan ataupun gas pada body baterai. Bentuk dan penampang baterai dapat dilihat berdasarkan gambar 2.18.



Gambar 2.18 Kontruksi baterai VRLA (Battery)

Baterai ini memiliki dua jenis menurut kontruksinya. Yaitu jenis gel cell dan jenis absorbent glass mat battery (AGM). Pada jenis gel menggunakan pasir silica sehingga cairan elektrolit berubah menjadi gel seperti agar-agar. Pada penerapannya, jenis gel cell tidak diperuntukkan pada aliran *supply* arus tinggi. Karena akan merusak gel didalamnya. Sedangkan pada jenis menggunakan separator didalamnya yang berupa fiber glass yang fungsinya menyerupai haduk yang akan menyerap cairan elektronit. Sehingga memiliki kelebihan yakni resistansi internanya yang kecil, sehingga pada pemanfaatnya memiliki kelebihan yaitu tahan lama.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian, pengujian dan analisis dilakukan secara umum dilakukan di :

Tempat : Lab. Sistem Tenaga Fakultas Teknik Universitas Jember

Alamat : Jl. Slamet Riyadi No. 62, Patrang, Kabupaten Jember

Waktu : Januari 2016 – April 2017

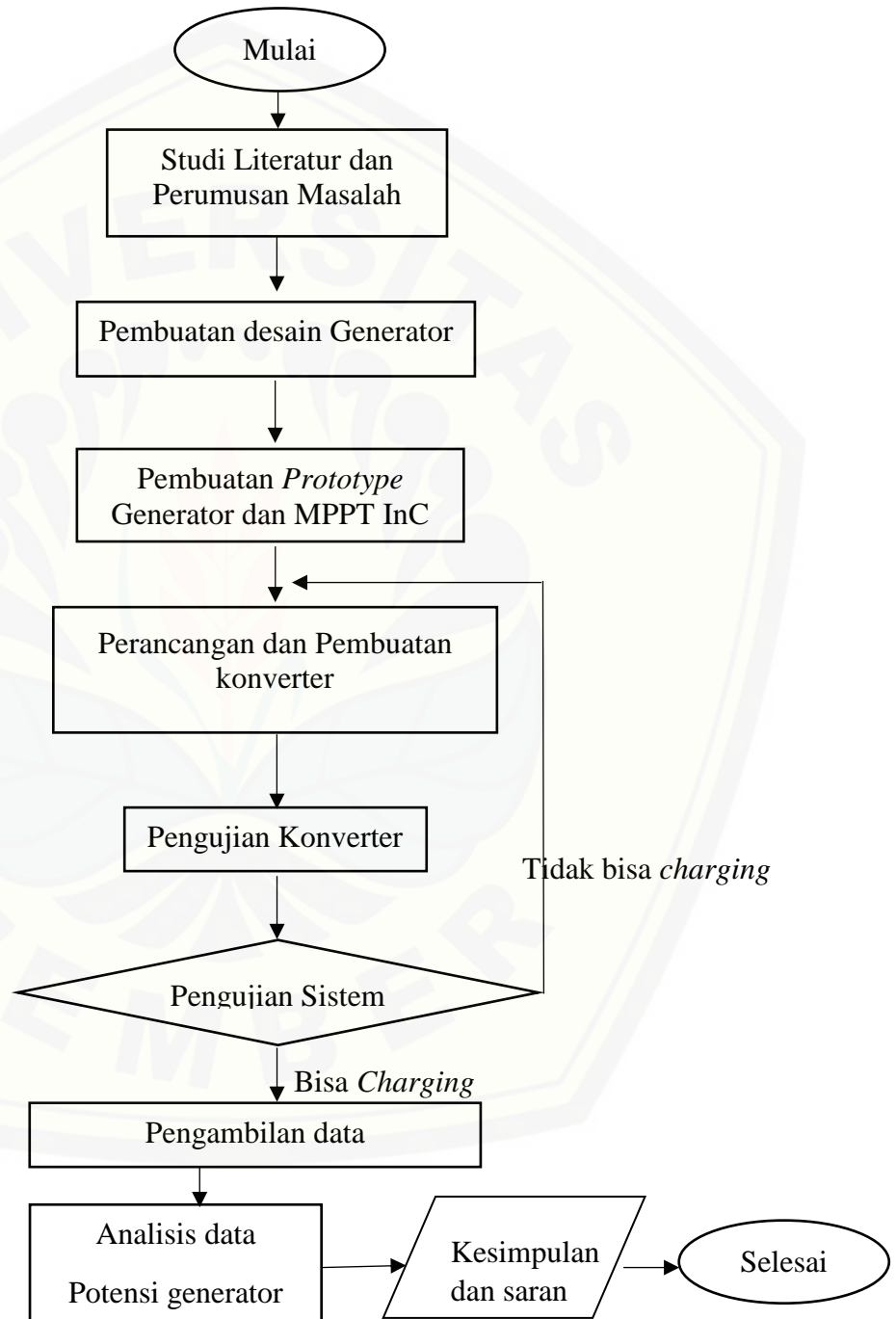
3.1.2 Waktu Penelitian

Tabel 3.1 Waktu penelitian

No	Kegiatan	Bulan															
		Januari				Februari				Maret				April			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Persiapan	■															
2	Studi Literatur dan Perumusan Masalah		■	■	■												
3	Pembuatan desain Generator		■	■	■												
4	Pembuatan <i>Prototype</i> Generator dan MPPT InC				■	■	■	■									
5	Perancangan dan Pembuatan konverter					■	■	■	■	■							
6	Pengujian Sistem										■	■	■	■	■		
7	Analisis Data potensi generator												■	■	■	■	
8	kesimpulan															■	■

3.2 Tahapan Penelitian

Penelitian mengenai MPPT INC dengan DC/DC SEPIC pada TEG akan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Untuk mencapai hasil penelitian pada tugas akhir ini, maka akan dilakukan beberapa tahapan sesuai diagram kerja yang telah ada diatas, yakni sebagai berikut

1. Tahap studi literatur dan perumusan masalah

Tahap ini merupakan tahapan untuk mencari sumber informasi terkait penelitian yang akan dilakukan,. Kemudian akan dilakukan perumusan masalah berdasarkan sumber yang ada.

2. Pembuatan desain Generator

Pada tahap ini akan dilakukan pendesainan *prototype* generator.

3. Pembuatan *Prototype* Generator dan MPPT InC

Tahap selanjutnya yaitu pembuatan *prototype* generator dan MPPT InC.

4. Perancangan dan pembuatan konverter tipe SEPIC

Pada tahap ini akan dilakukan perancangan dan pembuatan *converter* tipe SEPIC sesuai dengan spesifikasi dari modul dan baterai yang dipakai

5. Pengujian konverter

Pengujian konverter yang pertama adalah pengujian konverter tipe SEPIC yang telah dibuat dengan pengujian *duty cycle* untuk mengetahui besar efisiensi konverter

6. Tahap Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui apakah sistem sudah dapat melakukan proses *charging* atau belum. Apabila masih belum maka akan dilakukan perancangan ulang hingga sistem dapat melakukan proses *charging*.

7. Pengambilan data dan Analisis data potensi Generator

Pada tahap ini akan dilakukan pengambilan data sekaligus proses analisis data potensi generator termolektrik menggunakan panas

8. Kesimpulan dan saran

Tahap selanjutnya yaitu pengambilan kesimpulan dan juga saran terhadap data yang telah didapat. Kesimpulan dan saran akan menjadi referensi penelitian tahap selanjutnya. Pada kesimpulan akan dijelaskan juga mengenai potensi TEG.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang perlu dipersiapkan untuk melakukan penelitian adalah sebagai berikut :

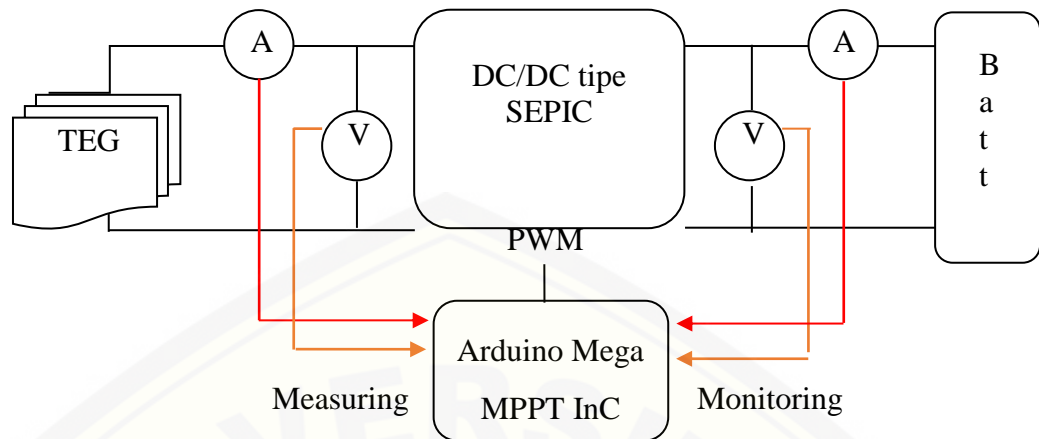
3.3.1 Alat

1. PC/Laptop
2. LCR meter
3. Datalogger
4. Mikrokontroler arduino mega
5. Kompor konvensional
6. Laptop
7. Infra red termometer
8. Electrical Tool set

3.3.2 Bahan

1. termoelektrik TE-MOD-10W4V-40
2. DC *converter* SEPIC
3. Baterai VRLA 6V 4.5 Ah
4. Sensor arus dan tegangan (INA219)
5. Tabung LPG
6. Pendingin generator (air)
7. Alumunium
8. Thermal paste
9. Induktor
10. Toroid
11. Kapasitor
12. Dan bahan penunjang lainnya.

3.4 Desain Sistem



Gambar 3.2 Blok diagram sistem

Pada gambar 3.2 menunjukkan diagram blok sistem kerja dari *prototype* penelitian ini. Ketika generator mulai bekerja dengan sumber panas dari udara kompor konvensional, maka pada generator akan timbul beda temperatur, yaitu panas yang berasal dari udara kompor konvensional, dan dingin yang berasal dari fluida air dan heatsink. Ketika muncul beda temperatur (Δt) maka pada modul TEG yang digunakan akan timbul beda potensial pada terminal modul TEG.

Pada penelitian ini akan digunakan beberapa pengukuran, yaitu pengukuran temperatur menggunakan termocouple, pengukuran arus, tegangan, dan daya menggunakan sensor INA219. Pengukuran arus maupun tegangan akan digunakan untuk parameter masukan algoritma MPPT. Algoritma MPPT akan menentukan besar *duty cycle* untuk mengontrol MOSFET. Perubahan temperatur pada sisi TEG akan menyebabkan perubahan energi yang dihasilkan modul TEG.

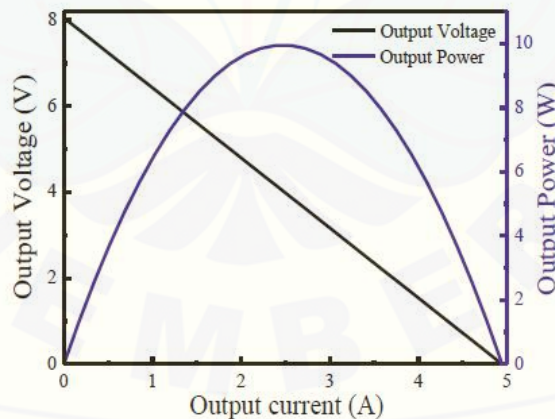
Algoritma MPPT InC yang ditanamkan pada mikrokontroler bertugas mencari titik daya maksimum dari TEG. Pencarian titik MPP digunakan untuk mengatur besar *duty cycle* yang dikirimkan pada konverter tipe SEPIC agar dapat menghasilkan tegangan keluaran yang konstan yaitu tegangan *charging* baterai sebesar 7.4 volt walaupun dalam daya yang berubah ubah karena perbedaan temperatur yang sulit dipertahankan pada TEG.

3.4.1 Perancangan TEG

Pada penelitian ini, digunakan 3 buah modul TE-MOD-10W4V-40. modul akan dirangkai secara seri (gambar 3.4), sehingga akan didapat tegangan total adalah penjumlahan tegangan pada masing masing modul. Modul termoelektrik ini menggunakan bahan yaitu Bi-Te dengan suhu maksimum sebesar 330° C. *Datasheet* dapat dilihat pada tabel 3.2 dimana memiliki tegangan *open circuit* pada perbedaan suhu 270° C sebesar 8 volt.

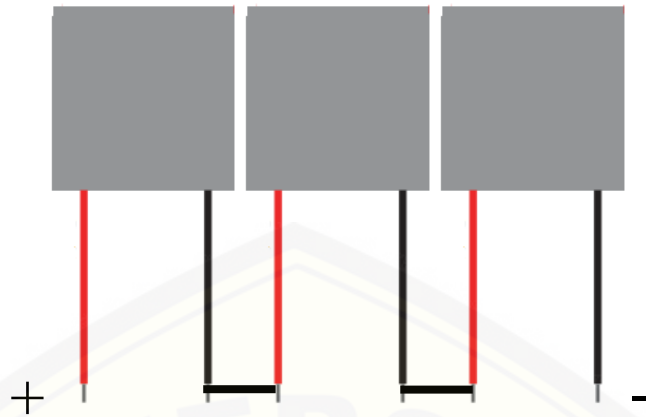
Tabel 3.2 *Datasheet* termoelektrik

Suhu Sisi Panas (° C)	300
Suhu Pada Sisi Dingin (° C)	30
Tegangan <i>Open circuit</i> (V)	8
Beban (ohms)	1.59
Tegangan Keluaran Saat Diberi Beban (V)	4
Arus Keluaran Saat Diber Beban (A)	2.4
Daya Keluaran Saat diberi Beban (W)	9.8
Dimensi	40x40 mm



Gambar 3.3 Grafik karakteristik TE-MOD-10W4V-40

Grafik pada gambar 3.3 menunjukkan karakteristik dari TE-MOD-10W4V-40 saat sisi panas dari modul tersebut diberikan suhu sebesar 300° C dan pada sisi dingin diberikan suhu sebesar 30° C.

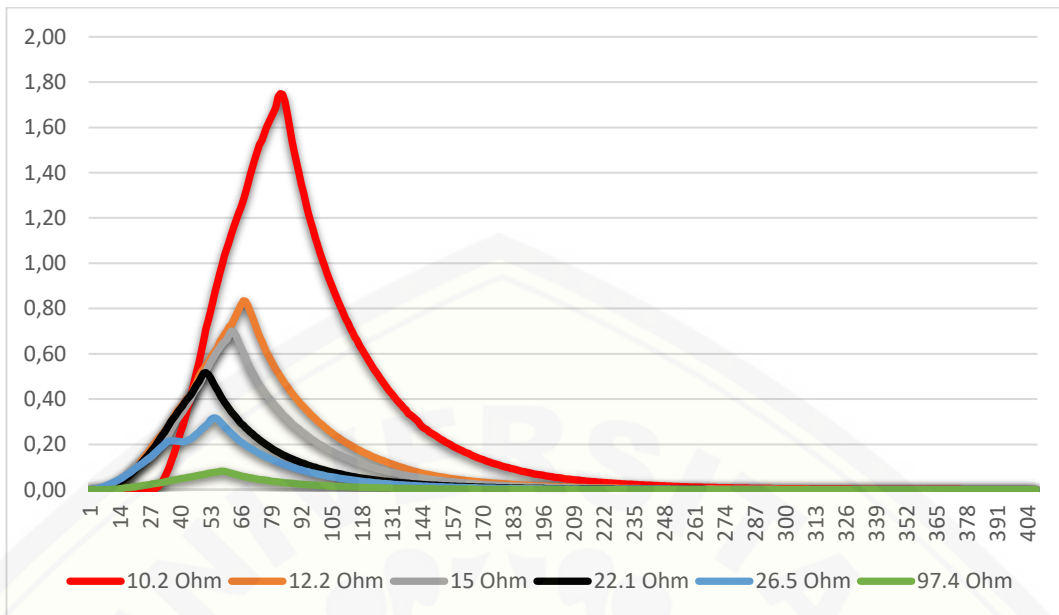


Gambar 3.4 Rangkaian modul TEG TE-MOD-10W4V-40

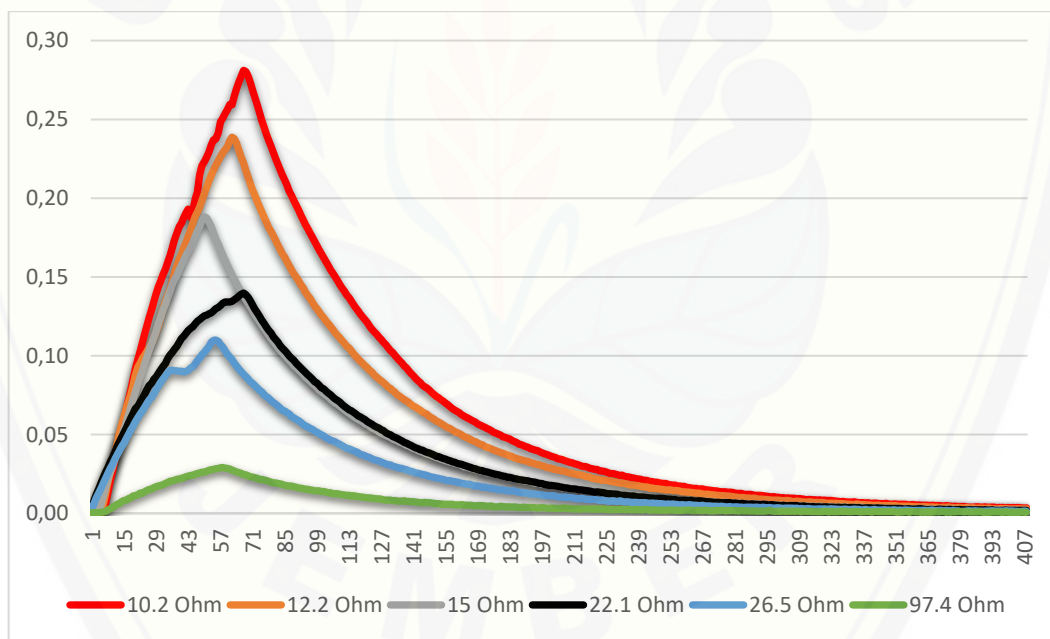
Untuk mengetahui karakteristik dari modul tersebut, maka dilakukan pengujian menggunakan sebuah modul TEG TE-MOD-10W4V-40. *Prototype* pengujian sesuai gambar 3.4. Dengan menggunakan pendingin heatsink dan fan, serta sumber panas dari kompor gas mini didapat data grafik pada gambar



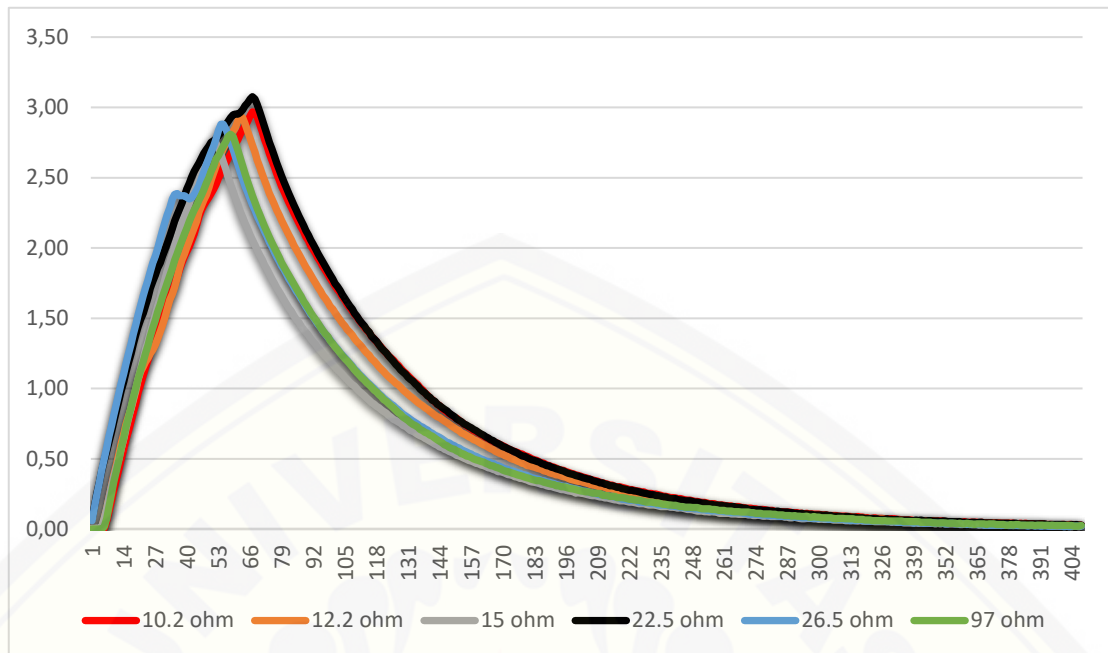
Gambar 3.5 *Prototype* pengujian modul TEG TE-MOD-10W4V-40



Gambar 3.6 Grafik daya pada pengujian modul TEG dengan beban bervariasi



Gambar 3.7 Grafik arus pada pengujian modul TEG dengan beban variabel

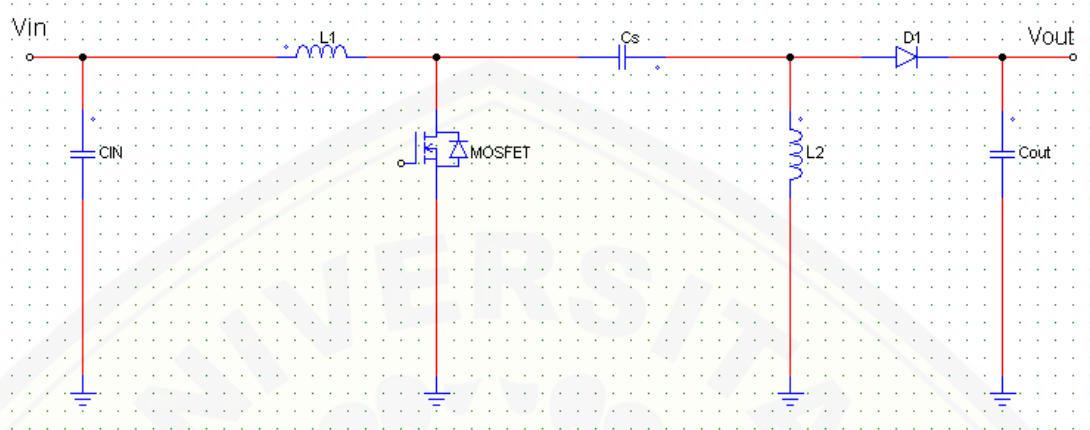


Gambar 3.8 Grafik tegangan pada pengujian modul TEG dengan beban variabel

Berdasarkan data daya 1.8 Watt yang dihasilkan pada masing-masing beban dapat pilihan bahwa tegangan minimum untuk sebuah modul yaitu sebesar 1 volt. Dan tegangan maksimum adalah 3.5 volt. Namun untuk penelitian ini digunakan tegangan maksimum sebesar 3 V untuk menjaga agar arus yang dihasilkan lebih besar. Besar tegangan maksimum yang dihasilkan ini tergantung pada besar hambatan yang dipakai serta besar beda temperatur yang diterima oleh sistem TEG. Data tersebut akan digunakan untuk melakukan perancangan konverter SEPIC yang akan digunakan.

3.4.2 Perancangan Konverter SEPIC

Pada penelitian ini digunakan DC/DC *converter* dengan jenis SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) *converter*.



Gambar 3.9 Rangkaian dasar SEPIC konverter (Psim)

Pada gambar 3.9 merupakan gambar rangkaian dasar SEPIC *Converter*, dimana terdapat beberapa komponen dasar yakni, inductor, kapasitor dan MOSFET. Untuk mendesain DC/DC *Converter* diperlukan beberapa parameter utama, yaitu spesifikasi dari *converter* tersebut. Spesifikasi tersebut disesuaikan dengan spesifikasi elemen TEG dan kapasitas baterai yang digunakan. Data spesifikasi atau karakteristik generator didapat dari pengujian pada *prototype* TEG yang menggunakan sebuah modul TEG.

Untuk menentukan tegangan masukan konverter diperoleh dari total penjumlahan tegangan seri modul TEG yaitu dengan asumsi bahwa TEG menghasilkan tegangan minimal 1 volt dan maksimal 3 volt (data pengujian) Sehingga didapat data sebagai berikut :

$$V_{min} = V_{teg1} + V_{teg2} + V_{teg3} = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ volt}$$

$$V_{max} = V_{teg1} + V_{teg2} + V_{teg3} = 3 + 3 + 3 = 9 \text{ volt}$$

Sedangkan untuk menentukan besar tegangan keluaran (*charging* baterai) didapat dari *datasheet* baterai. Dimana untuk baterai dengan spesifikasi 6 V 4.5 Ah memiliki minimal tegangan *charging* 7.1 volt dan tegangan maksimal *charging* 7.4 volt. Untuk arus keluaran konverter ditentukan berdasarkan arus minimum yang dibutuhkan untuk proses *charging* baterai yaitu sebesar 0.15 CA (*capacity ampere*)

sehingga dengan kapasitas 4.5 Ah didapat arus minimum proses *charging* sebesar 0.6A. Sedangkan arus maksimal didapat dari besar arus *short circuit* pada pengujian modul TEG sebesar 1 Ampere. Untuk frekuensi yang dipergunakan sesuai dengan frekuensi PWM yang dihasilkan oleh mikrokontrol yaitu sebesar 124 kHz.

Berikut ini spesifikasi DC/DC SEPIC *converter* yang akan dibuat :

Tabel 3.3 Spesifikasi DC/DC tipe SEPIC

Tegangan Masukan	3 volt hingga 9 volt
Tegangan Keluaran	7.4 Volt
Arus Keluaran	1 A
Frekuensi <i>Switching</i>	124 kHz

Sebelum mendesain DC/DC *converter* terlebih dahulu menentukan spesifikasi dari *converter* yang akan digunakan. spesifikasi *converter* yang digunakan sesuai dengan tabel 3.3. kemudian langkah selanjutnya yaitu melakukan perancangan ukuran masing masing komponen dengan menggunakan persamaan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Berdasarkan spesifikasi yang ditentukan, digunakan 3 buah beban untuk pengujian, yaitu sebesar 39 ohm, 47 ohm, dan 61 ohm. Untuk besar tegangan sampel diambil tegangan sebesar 6 V. langkah selanjutnya yaitu merancang komponen untuk membuat konverter tipe SEPIC, berikut ini Langkah – langkah menentukan nilai masing-masing komponen melalui perhitungan:

1. Menghitung *duty cycle*

Berdasarkan data spesifikasi yang akan dirancang dengan persamaan 2.10

$$D_{max} = \frac{7.4+0.5}{3+7.4+0.5} = 0.72 \qquad D_{min} = \frac{7.4+0.5}{9+7.4+0.5} = 0.47$$

2. Menentukan besar tegangan *Output* minimum dan maksimum ($V_{in} = 6V$)

$$V_{out} = V_{in} \frac{D}{(1-D)} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dmin (47%)	Dmax (72%)
$V_{out} = 6 \frac{0,47}{(1 - 0,47)} = 5,267 V$	$V_{out} = 6 \frac{0,72}{(1 - 0,72)} = 15,8 V$

3. Menentukan arus maksimum dan minimum

($V_{in} = 6V$; $R_{min} 39 \text{ ohm}$; $R_{max} 61 \text{ ohm}$)

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{RL} \dots\dots\dots(3.2)$$

I_{out}	$D_{min} = 47\%$	$D_{max} = 72\%$
Minimum	$I_{out} (min) = 0,086 \text{ A}$	$I_{out} (min) = 0,259 \text{ A}$
Maximum	$I_{out} (max) = 0,135 \text{ A}$	$I_{out} (max) = 0,405 \text{ A}$

4. Menentukan arus masukan

$$I_{in} = \frac{D \cdot I_{out}}{1-D} \dots\dots\dots(3.3)$$

I_{in}	$D_{min} = 47\%$	$D_{max} = 72\%$
Minimum	$I_{in} (min) = 0,07 \text{ A}$	$I_{in} (min) = 0,68 \text{ A}$
Maximum	$I_{in} (max) = 0,118 \text{ A}$	$I_{in} (max) = 1,06 \text{ A}$

5. Menentukan daya keluaran minimum dan maksimum ($V_{in} = 6 \text{ V}$)

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out}(max) \dots\dots\dots(3.4)$$

P_{out}	$D_{min} = 47\%$	$D_{max} = 72\%$
Minimum	$P_{out} (min) = 0,454 \text{ W}$	$P_{out} (min) = 4,092 \text{ W}$
Maximum	$P_{out} (max) = 0,711 \text{ W}$	$P_{out} (max) = 6,401 \text{ W}$

6. Pemilihan induktor

Arus ripple: $\Delta IL = I_{out} \times \frac{V_o}{V_{in} (min)} \times 40\% = 1 \times \frac{7.4}{3} \times 40\% = 0.98 \text{ A}$

Arus puncak L1:

$$IL1(peak) = I_{out} \times \frac{V_{out} + VD}{V_{in} (min)} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$$

$$IL1(peak) = 1 \times \frac{7.4+0.5}{3} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) = 3.16 \text{ A}$$

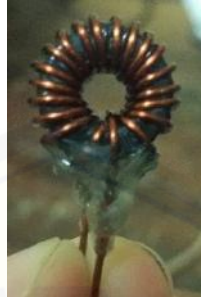
Arus puncak L2:

$$IL2(peak) = I_{out} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$$

$$IL2(peak) = 1 \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) = 1.2 \text{ A}$$

Induktansi: $L = L1 = L2 = \frac{V_{in} D}{\Delta IL f} = \frac{3 \times 0.72}{0.98 \times 124000} = 17.77 \text{ uH}$

Besar induktor $\geq 17.77 \mu\text{H}$. Sedangkan besar induktor yang digunakan minimal 25% lebih besar dari nilai perhitungan. Berikut hasil perancangan induktor



Gambar 3.10 Perancangan Induktor

Gambar 3.10 menunjukkan hasil perancangan induktor dengan tipe toroid FT50-43 (spesifikasi pada lampiran I). Diperoleh jumlah lilitan sebanyak 20 lilitan dengan diameter kawat 0.8 mm. diperoleh besar lilitan yaitu 900 μH .

7. Pemilihan MOSFET

$$\begin{aligned} I_{Q1} (\text{peak}) &= I_{L1} (\text{peak}) + I_{L2} (\text{peak}) \\ &= 3.16 + 1.2 = 4,36 \text{ A} \end{aligned}$$

Arus RMS Mosfet :

$$\begin{aligned} I_{Q1} (\text{rms}) &= I_{out} \sqrt{\frac{(V_{out} + V_{in}(\text{Min}) + VD * (V_{out} + VD))}{V^2_{in}}} \\ &= 1 \sqrt{\frac{(7.4+3+0.5*(7.4+0.5))}{3^2}} \\ &= 1.03 \text{ A} \end{aligned}$$

Batas tegangan minimal $V_{in} + V_{out} = 3 + 7.4 = 10.4 \text{ V}$. berdasarkan hasil perhitungan arus puncak dan arus rms serta tegangan minimal. Maka dipilih MOSFET dengan tipe P-channel yaitu IRF540. MOSFET ini sesuai karena memiliki V_{ds} maksimal 100 V (lebih besar dari batas tegangan), dengan I_{sm} maksimal 110 A, serta memiliki R_{ds} yang kecil yaitu sebesar 0,077 ohm. pemilihan R_{ds} yang semakin kecil akan meminimalisir besar daya losses pada MOSFET.

8. Pemilihan Dioda

Untuk menentukan dioda diperlukan tegangan minimum tegangan reverse yaitu

$$\begin{aligned} V_{RD1} &= V_{in} (\text{Max}) + V_{out} (\text{Max}) \\ V_{RD1} &= 9 + 7.4 = 16.4 \text{ V} \end{aligned}$$

9. Pemilihan kapasitor Cin

Kapasitor Cin berfungsi sebagai kapasitor filter tegangan masukan, agar *ripple* tegangan masukan lebih direduksi. Tegangan *ripple* maksimal pada rangkaian SEPIC diberikan dengan nilai tidak lebih dari 3 V. tegangan tersebut sehingga besar kapasitor input :

$$I_{cin} \text{ (rms)} = \frac{\Delta I L}{\sqrt{12}} = 0.28 \text{ A}$$

Sehingga besar Cin yaitu :

$$C_{in} = \frac{I_{cin} \text{ (max)}}{2 * f * \Delta V_{Cin}}$$

$$C_{in} = \frac{0,28}{2 * 124000 * 0.75}$$

$$C_{in} = 3.76 \text{ uF}$$

Besar kapasitas kapasitor input minimal 25% dari hasil perhitungan. Sehingga besar ukuran kapasitor minimal yaitu 4.7 uF. Untuk lebih memperkecil *ripple* tegangan maka, pada perancangan konverter SEPIC ini digunakan kapasitor sebesar 2200 uF.

10. Pemilihan kapasitor coupling (Cs)

Arus RMS pada Cs:

$$I_{cs(rms)} = I_{out} \times \sqrt{\frac{V_{out} + VD}{V_{in} \text{ (min)}}}$$

$$I_{cs(rms)} = 1 \times \sqrt{\frac{7.4+0.5}{3}} = 1.622 \text{ A}$$

Perhitungan Cs : (nilai $\Delta V_{Cs}=1\text{V}$)

$$C_S = \frac{I_{cs} * D_{max}}{f * \Delta V_{Cs}}$$

$$C_S = \frac{1.622 * 0.72}{124000 * 1}$$

$$C_S = 9.41 \text{ uF}$$

Untuk pemilihan kapasitor Cs atau kapasitor coupling adalah rating tegangan harus lebih besar 25% daripada tegangan *input* maksimum. Sehingga dipilih 10uF.

11. Pemilihan kapasitor *output*

V_{ripple} diasumsikan 2% dari tegangan *output*

$$V_{ripple} = 2\% \times 7.4 = 0.148 \text{ V}$$

Perhitungan ESR:

$$ESR \geq \frac{V_{ripple} \times VD}{IL1(peak) \times IL2(peak)}$$

$$ESR \geq \frac{0.148 \times 0.5}{3.16 \times 1.2} = 0.01697 \Omega$$

$$ESR \geq 16 \text{ m}\Omega$$

Perhitungan C_{out} :

$$C_{out} \geq \frac{I_{out} \times D_{mak}}{V_{ripple} \times f \times VD}$$

$$C_{out} \geq \frac{1 \times 0.72}{0.148 \times 124000 \times 0.5} \geq 78.985 \text{ uF}$$

C_{out} bernilai lebih dari 78.985 uF. Dikarenakan besar kapasitor minimal 25% dari hasil perhitungan, untuk lebih memperkecil nilai *ripple* tegangan, maka pada penelitian ini dipakai nilai sebesar 3300 uF.

Melalui persamaan tersebut, didapat beberapa nilai komponen konverter tipe SEPIC sesuai spesifikasi TEG serta sesuai dengan spesifikasi baterai yang digunakan. nilai parameter komponen sesuai persamaan matematis perhitungan komponen SEPIC terdapat pada tabel 3.4

Tabel 3.4 Parameter perancangan DC/DC SEPIC

Parameter	Nilai
Tegangan <i>input</i>	3 – 9 Volt
Tegangan <i>output</i> (V_{out})	7.4 Volt
Arus <i>output</i> (I_{out})	1 A
Frekuensi <i>switching</i> (f)	124 kHz
Induktor 1 dan 2 (L1 dan L2)	900 uH
Kapasitor <i>input</i> (C_{in})	2200 uF
Kapasitor <i>coupling</i> (C_s)	10 uF
Kapasitor <i>output</i> (C_{out})	1000 uF
MOSFET	IRF540
Dioda	1N5822
<i>Duty cycle min</i>	0.46
<i>Duty cycle max</i>	0.72

12. Menghitung *Power losses*

Power losses digunakan untuk mengetahui besar efisiensi rangkaian yang dipengaruhi oleh *power losses*. Asumsi awal nilai RL1 dan RL2 adalah 50mΩ.

a. Arus rms pada induktor 1 dan 2

$$I_{L1rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{in} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$I_{L1rms} (D = 47\%) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,118 = 0,137 A$$

$$I_{L1rms} (D = 72\%) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,106 = 1,232 A$$

- D = 47%, $P_{rL1} = RL1 * I_{L1rms} = 0,05 * 0,136 = 0,006 W$

- D = 72%, $P_{rL1} = RL1 * I_{L1rms} = 0,05 * 1,232 = 0,062 W$

$$I_{L2rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{out} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$I_{L2rms} (D = 47\%) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,135 = 0,156 A$$

$$I_{L2rms} (D = 72\%) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,405 = 0,468 A$$

- D = 47%, $P_{rL2} = RL2 * I_{L1rms} = 0,05 * 0,156 = 0,0078 W$

- D = 72%, $P_{rL2} = RL2 * I_{L1rms} = 0,05 * 0,468 = 0,023 W$

b. Total *Power losses* pada MOSFET

Nilai daya hilang pada MOSFET dapat dicari dari penjumlahan daya MOSFET saat *switching* (P_{sw}) dan daya MOSFET saat konduksi (P_{cond}). $R_{ds} = 20m\Omega$

$$I_{rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} (I_{in} + I_{out}) \dots\dots\dots(3.7)$$

- $I_{rms} (min) = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,076 + 0,682) = 0,8751 A$

- $I_{ms} (max) = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,118 + 1,06) = 1,369 A$

$$P_{Cond} = R_{ds} * I_{rms}^2 \dots\dots\dots(3.8)$$

- $P_{cond} (max) = R_{ds} * I_{rms}^2 = 0,02 * 0,8751 = 0,017 W$

- $P_{cond} (max) = R_{ds} * I_{rms}^2 = 0,02 * 1,369 = 0,027 W$

$$P_{sw} = Fs . Co . Vsm^2 \dots\dots\dots(3.9)$$

- $P_{sw} (min) = Fs \cdot Co \cdot Vsm^2 = 124 \cdot 10^3 \cdot 560 \cdot 10^{-12} (6 + 5,267)^2 = 0,008W$

- $P_{sw} (min) = Fs \cdot Co \cdot Vsm^2 = 124 \cdot 10^3 \cdot 560 \cdot 10^{-12} (6 + 15,8)^2 = 0,033W$

$$P_{MOSFET} = P_{cond} + P_{sw} \dots \dots \dots (3.10)$$

- $P_{MOSFET} (min) = 0,017 + 0,022 = 0,039 W$

- $P_{MOSFET} (max) = 0,027 + 0,083 = 0,11 W$

c. Daya saat dioda konduksi, $P_D = P_{VF} + P_{RF}$

Pada rangkaian SEPIC digunakan dioda dengan tipe dioda *schottky* 1N5822 dengan spesifikasi 3A, $V_f = 0,525V$, $V_{DM} = 40 V$ dan $R_F = 0,175\Omega$.

Sehingga, $P_{RF} = R_F \cdot I_{Drms}^2 = R_F \times \frac{I_{out} (max)^2}{\sqrt{1-D}}$

$$P_{VF} = V_F \times I_{out} (max) \dots \dots \dots (3.11)$$

- $D = 47\%$

$$P_{RF} = 0,175 \times \left(\frac{0,135}{\sqrt{1-0,47}}\right)^2 = 0,044 W$$

$$P_{VF} = 0,525 \times 0,135 = 0,071 W$$

- $D = 72\%$

$$P_{RF} = 0,175 \times \left(\frac{0,405}{\sqrt{1-0,72}}\right)^2 = 0,258 W$$

$$P_{VF} = 0,525 \times 0,405 = 0,213 W$$

$$P_D (min) = 0,044 + 0,071 = 0,115 W$$

$$P_D (max) = 0,258 + 0,213 = 0,4702 W$$

d. Daya yang dihasilkan oleh resistor internal kapasitor filter

Pada rangkaian SEPIC terdapat 3 buah kapasitor yaitu C_{in} , C_S , dan C_{out} . Untuk menentukan P_{rc} , sesuai dengan persamaan 3.12. Diasumsikan nilai ESR masing-masing komponen adalah sama yaitu $0,01 \Omega$.

- C_{in}

$$P_{rcin} = (I_{in} \sqrt{\frac{D}{(1-D)}})^2 * R_{in} \dots \dots \dots (3.12)$$

$$P_{rcin} (Dmin) = 0,1185 \sqrt{\frac{0,47}{(1-0,47)}}^2 * 0,01 = 0,00124 W$$

$$P_{rcin} (D_{min}) = 1,0668 \sqrt{\frac{0,47}{(1-0,47)}}^2 * 0,01 = 0,029 \text{ W}$$

- C_s

$$P_{rcs} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} I_{in} \sqrt{\frac{D}{(1-D)}}\right)^2 * R_{in} \dots \dots \dots (3.13)$$

$$P_{rcs} (D_{Min}) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,1185 \sqrt{\frac{0,47}{(1-0,47)}}\right)^2 * 0,01 = 0,000126 \text{ W}$$

$$P_{rcs} (D_{Max}) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,1067 \sqrt{\frac{0,72}{(1-0,72)}}\right)^2 * 0,01 = 0,039 \text{ W}$$

- C_{out}

$$P_{cout} = \left(I_{crms} \sqrt{\frac{D}{(1-D)}}\right)^2 * R_{in} \dots \dots \dots (3.14)$$

$$I_{crms} = I_{out};$$

$$D_{min}, P_{cout} = \left(0,135 * \sqrt{\frac{0,47}{(1-0,47)}}\right)^2 * 0,01 = 0,00016 \text{ W}$$

$$D_{max}, P_{cout} = \left(0,405 * \sqrt{\frac{0,72}{(1-0,72)}}\right)^2 * 0,01 = 0,0042 \text{ W}$$

e. Total disipasi daya (*power losses*)

$$PLS = P_{cond} + P_{sw} + P_{rL1} + P_{rL2} + P_D + P_{rCin} + P_{rCs} + P_{rCout}$$

- D = 47%

$$PLS = 0,017 + 0,0088 + 0,006 + 0,0078 + 0,115 + 0,00124 + 0,000126 + 0,00016 = 0,156 \text{ W}$$

- D = 72%

$$PLS = 0,027 + 0,033 + 0,062 + 0,468 + 0,4702 + 0,029 + 0,039 + 0,0042 = 1,1324 \text{ W}$$

f. Efisiensi SEPIC *converter*

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + PLS} 100\% \dots \dots \dots (3.15)$$

- D_{min} (47%)

$$\eta = \frac{0,711}{0,711 + 0,156} 100\% = 81,9\%$$

- D_{max} (72%)

$$\eta = \frac{6,401}{6,401 + 1,156} 100\% = 84,9\%$$

3.4.3 Baterai VRLA 6V 4.5Ah

Pada penelitian ini, digunakan baterai dengan tipe *valve regulated lead acid* (VRLA) dengan besar tegangan 6V dengan kapasitas 4.5 Ah. Baterai akan digunakan sebagai beban yang memiliki resistansi yang berubah-ubah secara dinamis yang tergantung pada kapasitas baterai tersebut.

Pada gambar 3.11 ditunjukkan bentuk fisik dari baterai yang akan digunakan untuk penelitian ini.



Gambar 3.11 Bentuk fisik baterai 6V/4.5Ah

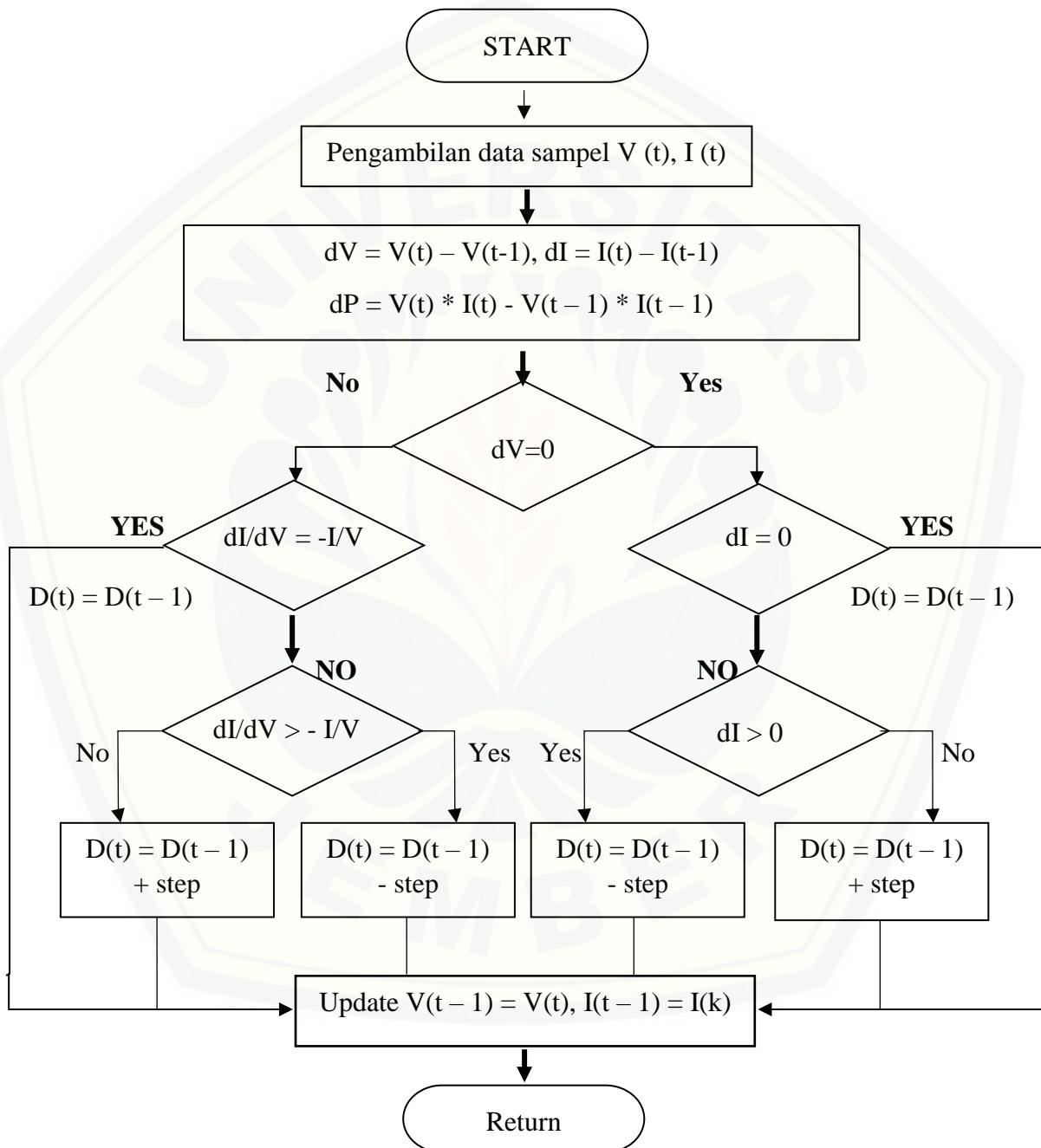
Baterai yang digunakan pada penelitian ini merupakan baterai dengan kapasitas 6V/4.5Ah tipe VRLA LC-R064R5P buatan panasonic. Spesifikasi lengkap dari baterai yang dipergunakan terdapat pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Spesifikasi baterai

	Nominal Voltage	6V
	Rated capacity (20 Hour)	4.5 Ah
Dimensions	length	70 mm
	Width	48 mm
	Height	108 mm
	Total Height	100.0 mm
Capacity	20 Hours	4.5 Ah
	10 Hours	4.1 Ah
	3 Hour	3.6 Ah
	1 Hour	3.1 Ah
	Approx. mass	0.70 kg

3.4.4 Flowchart MPPT Incremental conductance

Berikut ini (gambar 3.12) Flowchart algoritma *Incremental conductance*. Algoritma MPPT yang akan diterapkan pada mikrokontroler sebagai pengontrol *duty cycle* untuk mencari titik daya maksimum sesuai dengan beban.



Gambar 3.12 Flowchart algoritma MPPT incremental conductance (Inc)

Pada penelitian ini akan dipakai algoritma MPPT yaitu *Incremental conductance* (InC). Algoritma ini memanfaatkan perubahan *conductance* untuk mencari titik maksimum dari daya yang dihasilkan oleh TEG. *Conductance* pada pembangkit merupakan perbandingan antara arus dan tegangan.

$$Conductance = \frac{I}{V} \dots \dots \dots (3.16)$$

Metode MPPT ini memanfaatkan perubahan *conductance* atau *Incremental conductance* (InC) untuk mencari titik MPP pada tiap iterasi. Ada 3 kondisi penting yang terjadi pada MPPT InC ini. Yaitu ketika pada posisi MPP, *left of MPP*, *right of MPP*. MPP atau titik maksimum merupakan kondisi dimana dP/dV memiliki hasil yaitu sama dengan nol (0). *Left of MPP* merupakan kondisi dimana titik tracking bergeser ke kiri dari titik MPP atau kondisi ini terjadi ketika nilai dari $dP/dV > 0$. Sedangkan *right of MPP* merupakan kondisi dimana titik tracking bergeser ke kanan dari titik MPP atau kondisi ini terjadi ketika nilai dari $dP/dV < 0$. Pada gambar 3.5 menjelaskan bagaimana algoritma ini mencari titik maksimum dengan cara membandingkan perubahan *conductance* dari data lama dan dibandingkan dengan data baru.

Algoritma ini diawali dari pengambilan data tegangan dan arus oleh sensor. Data arus dan tegangan yang diambil merupakan data arus dan tegangan dari keluaran modul TEG. Data tersebut akan di inisialisasi oleh variabel baru yaitu dV dan dI . Dimana nilai dV merupakan pengurangan dari tegangan baru dengan tegangan sebelumnya ($V(t) - V(t-1)$) sedangkan dI merupakan data baru pengurangan arus baru dengan arus sebelumnya ($dI = I(t) - I(t-1)$), serta variabel dP pengurangan data daya baru dengan daya sebelumnya ($V(t) * I(t) - V(t-1) * I(t-1)$)

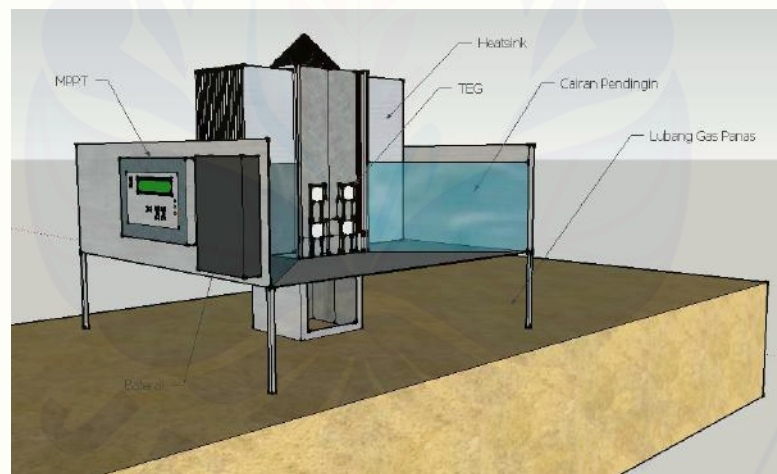
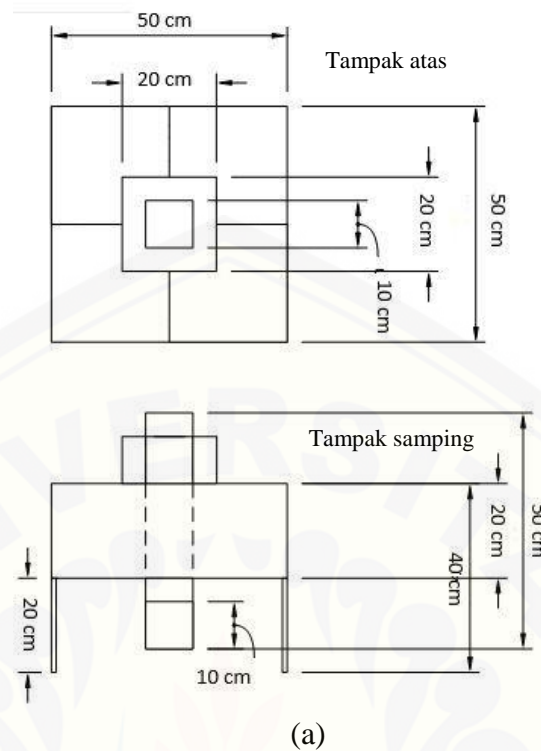
Kondisi titik maksimum atau MPP terjadi ketika perbandingan antara dV dan dP bernilai nol. Hal ini akan lebih dirincikan kembali dengan pengambilan keputusan yaitu pada kondisi ketika dV bernilai nol. Ketika kondisi ini belum memenuhi maka algoritma akan melakukan proses pengambilan keputusan lagi yaitu $dI/dV = -I/V$. Apabila kondisi terpenuhi, maka mikrokontrol akan mengirimkan *duty cycle* sama seperti *duty cycle* sebelumnya atau $D(t) = D(t-1)$. Namun apabila kondisi tersebut belum memenuhi maka algoritma akan mengambil

keputusan yaitu $dI/dV > -I/V$. Kemudian algoritma akan melakukan pengambilan keputusan kembali yaitu ketika kondisi $dI/dV > -I/V$ Terpenuhi maka langkah selanjutnya yaitu memperbaharui *duty cycle* yang akan dikirim mikrokontrol sebesar $D(t) = D(t - 1) + \text{step}$. Namun apabila kondisi tidak terpenuhi maka *duty cycle* akan diperbaharui dengan nilai $D(t) = D(t - 1) - \text{step}$. Kemudian ketika kondisi $dV = 0$ terpenuhi maka tahap selanjutnya yaitu pengambilan keputusan kembali dengan perintah $dI = 0$. Apabila kondisi $dI = 0$ terpenuhi maka sistem akan langsung mengirim *duty cycle* seperti nilai sebelumnya ($D(t) = D(t - 1)$). Namun jika kondisi tersebut tidak terpenuhi maka akan dilakukan pengambilan keputusan kembali oleh sistem yaitu dengan perintah $dI > 0$. Jika perintah tersebut bernilai benar maka tahap selanjutnya yaitu memperbaharui nilai *duty cycle*. jika perintah tersebut bernilai benar maka nilai *duty cycle* ($D(t)$) adalah $D(t) = D(t - 1) + \text{step}$. Jika kondisi tersebut tidak terpenuhi maka *duty cycle* akan diperbaharui dengan nilai $D(t) = D(t - 1) - \text{step}$.

Tahap terakhir dari metode MPPT ini yaitu proses memperbaharui nilai tegangan dan arus. Yaitu dengan kondisi $V(t - 1) = V(t)$, $I(t - 1) = I(k)$. setelah proses *update* nilai data tegangan dan arus terbaru maka tahap selanjutnya yaitu proses kembali pada pembacaan data sensor tegangan dan arus.

3.5 Desain Hardware

Hardware yang digunakan menitikberatkan pada *heat exchanger*. Hal ini dikarenakan, pendinginan pada TEG sangat berpengaruh terhadap *energy* yang dihasilkan. Desain *hardware* TEG yang dibuat menggunakan sumber panas berupa udara ataupun api. Sedangkan pada pendinginnya menggunakan dua pendinginan, yaitu heatsink dan air. Hal ini dikhususkan untuk meningkatkan pendinginan pada generator. Berikut desain dimensi dan desai 3D TEG pada gambar 3.13



a) Rancangan dimensi TEG; b) Rancangan desain 3D TEG

Gambar 3.13 Desain *hardware* TEG

Pada gambar 3.13 a merupakan dimensi generator, sedangkan 3.13 b merupakan desain 3D TEG yang mana bagian utama, yaitu ruang pendingin berupa kolam air sebagai pendingin dengan tambahan heatsink. Kemudian bagian TEG sebagai tempat elemen termoelektrik dan jalur aliran fluida panas.

3.6 Rencana Pengujian Potensi Termoelektrik Generator (TEG)

Untuk mengetahui besar potensi TEG maka akan dilakukan beberapa tahapan pengujian terhadap TEG yang memanfaatkan panas yakni sebagai berikut.

3.6.1 Pengujian Konverter DC/DC Tipe SEPIC

Sebelum konverter diimplementasikan pada TEG, terlebih dahulu dilakukan pengujian pada konverter untuk mengetahui besar efisiensi dari konverter yang telah di rancang. Pengujian dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu pengujian konverter tanpa beban, pengujian konverter dengan beban variasi, dan pengujian konverter dengan beban baterai. Berikut pada tabel variabel data yang akan dicari.

Tabel 3.6 Data pengujian pengujian konverter tipe SEPIC

<i>Duty cycle</i>	<i>Input SEPIC Converter</i>			<i>Output SEPIC Converter</i>			Eff
	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}	
40%							
45%							
50%							
55%							
60%							
65%							
70%							

Pada tabel 3.6 akan menjadi patokan pengambilan data karakteristik dari konverter tipe SEPIC. Data tersebut merupakan data pengambilan secara langsung pada pengujian generator.

3.6.2 Pengujian MPPT

Untuk mengetahui performa algoritma MPPT yang telah dibuat, maka terlebih dahulu dilakukan pengujian performa, dengan cara menankan program MPPT pada konverter. Kemudian melakukan percobaan dengan menggunakan *power supply*. Selanjutnya digunakan beban bervariasi. Beban yang bervariasi inilah yang akan menentukan besar daya maksimum yang dapat dicapai oleh konverter.

Besar daya dipengaruhi oleh perubahan *duty cycle* yang secara dinamis berubah mengikuti besar beban untuk mencari titik daya maksimum. Konverter akan bekerja baik *buck* maupun *boost*. Sehingga walaupun beban berubah-ubah, maka MPPT akan berusaha untuk mempertahankan daya pada kondisi maksimumnya.

Berikut ini merupakan tabel rencana pengujian MPPT, dengan menggunakan *power supply* sebagai pengganti objek TEG.

Tabel 3.7 Data pengujian TEG

Beban (ohm)	V_{PS} (V)	Konverter					
		<i>Input</i>			<i>Output</i>		
		V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{out}

V_{PS} (tegangan PS)

V_{OUT} (tegangan beban)

V_{IN} (tegangan *input* konverter)

I_{OUT} (arus beban)

I_{IN} (arus *input* konverter)

P_{OUT} (daya beban)

P_{IN} (daya *input* konverter)

3.6.3 Pengujian Sistem dan Performa TEG

Pengujian sistem TEG dilakukan untuk mengetahui potensi pembangkitan listrik dengan panas dari sumber api. Pengujian dibagi menjadi 2 yaitu pengujian karakteristik dan pengujian sistem *charging* generator pada baterai 6V. Mengacu pada penelitian sebelumnya (Khalily, 2015) dengan beberapa variabel sesuai pada tabel 3.8 dan 3.9.

Tabel 3.8 Data pengujian karakteristik TEG

suhu (°C)			Karakteristik Tanpa Beban		Karakteristik Berbeban		
T_{hot}	T_{cold}	ΔT	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{load} (V)	I_{load} (A)	P_{load} (Watt)

Pada tabel 3.8 merupakan data variabel hasil yang ingin didapatkan. Variable tersebut merupakan pengujian generator ketika tanpa beban maupun saat berbeban. Hal ini untuk mengetahui karakteristik TEG yang telah dibuat. Pada pengujian tanpa beban, data yang akan dicari yaitu tegangan *output* TEG dan data suhu, baik suhu sisi dingin (T_{cold}) dan suhu sisi panas (T_{hot}). Sedangkan pada saat pengujian berbeban, data yang akan dicari yaitu tegangan beban atau tegangan *output* TEG (V_{load}), arus beban atau arus *output* TEG (I_{load}) dan daya beban atau daya *output* TEG (P_{load}).

Tabel 3.9 Data pengujian sistem TEG

ΔT (°C)	P_{TEGMAX}	<i>Direct Charging</i>			Konverter						<i>Eff</i> (%)
					<i>Charging dengan MPPT</i>						
		V_{direct}	I_{direct}	P_{direct}	V_{in}	I_{in}	P_{in}	V_{mppt}	I_{mppt}	P_{mppt}	

Pada tabel 3.9 menjelaskan tentang target data acuan untuk mengetahui besar efisiensi TEG yang telah dirancang dengan diterapkan metode MPPT. Akan dicari dua data kondisi yaitu ketika TEG menggunakan MPPT dan ketika TEG tanpa menggunakan MPPT (*direct charging*). Variabel yang dicari pada pengujian *charging* langsung yaitu V_{direct} (tegangan *charging* secara langsung), I_{direct} (arus *charging* secara langsung) dan P_{direct} (daya *charging* secara langsung). Variabel yang dicari pada pengujian *charging* dengan MPPT InC yaitu V_{in} (tegangan MPP atau tegangan *output* TEG), I_{in} (arus MPP atau tegangan *output* TEG) dan P_{in} (daya MPP atau daya *output* TEG). Sedangkan V_{mppt} , I_{mppt} , P_{mppt} , merupakan sisi *output* konverter atau beban.

Sehingga luaran dari data tersebut akan didapatkan besar efisiensi dari generator, efisiensi operasi, dan pengaruh daya ketika diimplementasikan MPPT dan tanpa MPPT. Sehingga pada tahap selanjutnya dapat dianalisis potensi penggunaan TEG dengan panas. Perbedaan nilai hasil akan diambil rata-rata pada masing-masing pengujian sesuai desain yang telah dibuat. akan dilakukan perhitungan mengenai biaya yang dibutuhkan untuk memenuhi target, yaitu mengisi baterai 6V 4.5 Ah, dalam waktu 2.5 jam.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah mengenai “Implementasi dc/dc tipe SEPIC pada TEG menggunakan kontrol MPPT *Incremental conductance* (InC)”, maka dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Performa konverter SEPIC cukup baik dengan efisiensi rata-rata sebesar 60% dan dapat bekerja sebagai *buck* maupun *boost*. Pemilihan komponen konverter sangat berpengaruh terhadap *power losses* (PLS) dan efisiensi konverter. Semakin kecil nilai resistansi internal dari tiap komponen, maka semakin kecil *power losses* yang dihasilkan.
2. Performa konverter dan MPPT InC ketika diimplementasikan pada proses *charging* TEG memiliki performa yang lebih baik dibanding saat *charging* secara langsung. Daya *charging* dengan MPPT InC pada saat ΔT 119°C mencapai 1.7 W, sedangkan pada saat *direct* hanya sebesar 1.24W. MPPT InC mampu meningkatkan daya hingga 0.46 W atau 37%. Disamping itu, konverter tidak dapat bekerja pada kondisi *buck*, dikarenakan tegangan *charging* TEG berada dibawah tegangan baterai, sehingga konverter hanya bekerja sebagai *boost*.
3. Generator termoelektrik yang telah didesain memiliki performa yang cukup baik sebagai sumber energi listrik dengan memanfaatkan sumber energi panas. Efisiensi rata-rata yang didapat dari generator yaitu 3.33 %. Selain itu, TEG yang didesain kurang ekonomis, dikarenakan untuk mencapai target melakukan *charging* baterai 6V 4.5 Ah dengan waktu 2.5 jam membutuhkan 84 buah TEG dengan total biaya cukup besar yakni sebesar Rp. 32.886.000.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang didapat, didapatkan beberapa kekurangan. Sehingga terdapat saran untuk lebih menyempurnakan hasil penelitian sebagai berikut

1. Perlu menggunakan komponen konverter yang lebih baik untuk menekan *power losses*. pemilihan komponen dengan nilai resistansi dalam semakin kecil akan menghasilkan *power losses* semakin kecil. sehingga dapat meningkatkan efisiensi daya konverter.
2. Perlu penyempurnaan desain generator yang dapat menghasilkan beda temperatur yang besar sehingga daya yang dihasilkan oleh generator juga akan semakin besar. Hal ini akan mengurangi total biaya yang dibutuhkan untuk mencapai target potensi TEG.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahiska, R., & Mamur, H. (2014). A Review: Thermoelectric Generators in Renewable Energy. *International Journal of Renewable Energy Research*, 133.
- Battery, B. B. (n.d.). *Valve Regulated lead Acid battery manual*. USA: B B. Battery.
- Chiang, S. J., & Shief, H.-J. (2009). Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter. *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, 4344-4353.
- Dey, A., Prakash, O. B., Sikder, A. K., & Chattopadhyay, S. (2016). Recent advances in CNT/graphene based thermoelectric polymer nanocomposite: A proficient move towards waste energy harvesting. *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 653-671.
- Eakburanawat, j., & Boonyaroonate, I. (2010). Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique. 2.
- ESDM, M. (2016). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang Pengesahan RUPLT PT. PLN tahun 2016 S.D. 2025*. Jakarta: Menteri ESDM.
- freeman, d. (2010). *Introduction to photovoltaic systems maximum power point traking*. texas: Texas Instrument.
- Gao, H. B., Huang, H. H., H.J. Li, Z. Q., & Zhang, Y. (2015). *Development of stove-powered thermoelectric generators: a riview*. china: Applied Thermal Engineering.
- Ian Laird, D. D.-C. (2013). High Step-Up DC/DC Topology and MPPT Algorithm for Use With a Thermoelectric Generator. *IEEE*, 28(7).
- Irwin, J. D. (2002). *The Power Electronic Handbook*. california: CRC Press.
- julyanto, h. (2016, 12 1). *HJF Ringan*. Retrieved from hjf-ringan.blogspot.co.id: <http://hjf-ringan.blogspot.co.id/2012/08/komporkayu-kecil-ramahlingkungan-dan.html>
- Khalily, J. (2015). *Pemanfaatan sumber air panas di blawan bondowoso sebagai pembangkit listrik alternatif berbasis TEC*. Jember: Digital repository Universitas Jember.

- Kok, T. S., Mekhilef, S., & Safari, A. (2013). Simple and low cost *incremental conductance* maximum power point tracking using *buck-boost* converter. *Journal of renewable energy and sustainable energy* 5, 1-12.
- kominfo.go.id. (2016, november 25). *kemntrian komunikasi dan informatika*. Retrieved from kominfo web:
https://web.kominfo.go.id/sites/default/files/0510_Kebutuhan_Listrik_Indonesia_01_rsz.jpg
- Laird, I., & Lovatt, H. (2008). Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Thermoelectric Generators. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08)*, 1-6.
- Lokanadham, M., & Bhaskar, K. V. (2012). *Incremental conductance* Based Maximum power point tracking (MPPT) for Photovoltaic System. *IJERA*, 1420-1424.
- Mamur, H., & Ahiska, R. (2015). Application of a DC-DC *boost* converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. *Science Direct*, 265-272.
- Montecucco, & Andrea. (2015). Maximum power point tracking converter based on the Open circuit voltage method for thermoelectric. *IEEE*, 828-839.
- PANASONIC. (2005). *VRLA BATTERIES Charging Method*. PANASONIC.
- Ranjan, S. B., & Kumar, T. M. (2013). *Design of single ended primary inductor dc/dc converter*. India: National Institute of Technology.
- Rashid, M. H. (2001). *Power Electronics Handbook*. California: Academic Press.
- Rowe, D. M. (1995). *Handbook of Thermoelectrics*. United States: CRC Press.
- S, S., & Joseph, J. (2016). Design and Implementation of SEPIC Converter based PV System Using Modified *Incremental conductance* Algorithm. *ICEEOT*.
- Shawwaf, A. (2010). *Optimization of the electric properties of thermoelectric generators*. Sweden: Lund University.
- Vorperian, V. (2006). *Analysis of SEPIC Converter*. Roswell: Ridley Engineering Inc.
- William, I. C., & Ramesh, D. R. (2013). Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 402-408.

Yunianto, B., Sinaga, N., & S.A.K, R. (2014). Pengembangan Disain Tungku Bahan Bakar Kayu Rendah Polusi dengan Menggunakan Dinding Beton Semen. *ROTASI*, 28-33.

Zhang, D. (2013). *AN-1484 Designing A SEPIC Converter*. Texas Instruments.



LAMPIRAN

A. Kalibrasi Sensor



Kalibrasi sensor arus INA219



Kalibrasi sensor tegangan



Kalibrasi Termocouple



B. Data Pengujian Tanpa Beban

Pengujian Tanpa Beban Dengan Vin 3 V

<i>Duty cycle</i>	Performa Konverter				
	<i>Vin</i>	<i>Vout</i>	<i>vteori</i>	<i>error</i>	
0,4	40	3	2,5	2,0	-25,00
0,45	45	3	2,9	2,5	-18,15
0,5	50	3	3,1	3,0	-3,33
0,55	55	3	3,76	3,7	-2,55
0,6	60	3	4,51	4,5	-0,22
0,65	65	3	5,51	5,6	1,10
0,7	70	3	6,8	7,0	2,86
0,75	75	3	8,56	9,0	4,89
0,8	80	3	12,08	12,0	-0,67

Pengujian Tanpa Beban Dengan Vin 9 V

<i>Duty cycle</i>	performa konverter				
	<i>Vin</i>	<i>vout</i>	<i>vteori</i>	<i>error</i>	
0,4	40	9	8	6	-33,33
0,45	45	9	8,4	7	-14,07
0,5	50	9	9,07	9	-0,78
0,55	55	9	11,4	11	-3,64
0,6	60	9	13,79	14	-2,15
0,65	65	9	16,81	17	-0,57
0,7	70	9	20,7	21	1,43
0,75	75	9	25,86	27	4,22
0,8	80	9	35,42	36	1,61

C. Data Pengujian Dengan Beban

Pengujian konverter dengan Vin 3 dan R 39 ohm

No	Duty	<i>Input Konverter</i>			<i>Output Konverter</i>			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	3	0,030	0,090	1,670	0,040	0,067	74
2	45	3	0,040	0,120	2,030	0,040	0,081	68
3	50	3	0,060	0,180	2,400	0,050	0,120	67
4	55	3	0,110	0,330	3,080	0,070	0,216	65
5	60	3	0,160	0,480	3,640	0,080	0,291	61
6	65	3	0,220	0,660	4,260	0,100	0,426	65
7	70	3	0,310	0,930	4,800	0,110	0,528	57
8	75	3	0,430	1,290	5,170	0,120	0,620	48
9	80	3	0,510	1,530	4,350	0,100	0,435	28

Pengujian konverter dengan Vin 3 dan R 47 ohm

No	Duty	<i>Input Konverter</i>			<i>Output Konverter</i>			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	3	0,02	0,06	1,69	0,030	0,0507	85
2	45	3	0,033	0,099	2,06	0,04	0,0824	83
3	50	3	0,05	0,15	2,57	0,047	0,12079	81
4	55	3	0,09	0,27	3,15	0,060	0,189	70
5	60	3	0,13	0,39	3,74	0,070	0,2618	67
6	65	3	0,19	0,57	4,39	0,080	0,3512	62
7	70	3	0,28	0,84	5,07	0,100	0,507	60
8	75	3	0,39	1,17	5,6	0,11	0,616	53
9	80	3	0,52	1,56	5,2	0,1	0,52	33

Pengujian konverter dengan Vin 3 dan R 61 ohm

No	Duty	Input Konverter			Output Konverter			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	3	0,02	0,06	1,72	0,027	0,04644	77
2	45	3	0,03	0,09	2,1	0,03	0,063	70
3	50	3	0,04	0,12	2,50	0,030	0,075	63
4	55	3	0,09	0,27	3,24	0,050	0,162	60
5	60	3	0,11	0,33	3,88	0,050	0,194	59
6	65	3	0,16	0,48	4,60	0,070	0,322	67
7	70	3	0,24	0,72	5,40	0,080	0,432	60
8	75	3	0,34	1,02	6,18	0,09	0,5562	55
9	80	3	0,53	1,59	6,59	0,1	0,659	41

Pengujian konverter dengan Vin 9 dan R 39 ohm

no	duty	Input konverter			Output Konverter			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	9	0,100	0,900	5,590	0,130	0,727	81
2	45	9	0,150	1,350	6,670	0,160	1,067	79
3	50	9	0,220	1,980	7,920	0,190	1,505	76
4	55	9	0,370	3,330	9,770	0,240	2,345	70
5	60	9	0,530	4,770	11,260	0,270	3,040	64
6	65	9	0,760	6,840	12,700	0,310	3,937	58
7	70	9	1,100	9,900	13,750	0,330	4,538	46
8	75	9	1,530	13,770	10,600	0,260	2,756	20
9	80	9	1,700	15,300	9,200	0,220	2,024	13

Pengujian konverter dengan Vin 9 dan R 47 ohm

No	Duty	Input Konverter			Output Konverter			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	9	0,09	0,81	5,64	0,110	0,6204	77
2	45	9	0,13	1,17	6,76	0,13	0,8788	75
3	50	9	0,20	1,8	8,05	0,160	1,288	72
4	55	9	0,31	2,79	10,00	0,200	2	72
5	60	9	0,45	4,05	11,64	0,230	2,6772	66
6	65	9	0,66	5,94	13,30	0,270	3,591	60
7	70	9	0,98	8,82	14,75	0,300	4,425	50
8	75	9	1,42	12,78	12,5	0,25	3,125	24
9	80	9	1,83	16,47	9,7	0,19	1,843	11

Pengujian konverter dengan Vin 9 dan R 61 ohm

No	Duty	Input Konverter			Output Konverter			Eff
		Vin	Iin (A)	Pin	Vout	Iout	Pout	
1	40	9	0,07	0,63	5,70	0,080	0,456	72
2	45	9	0,11	0,99	6,86	0,1	0,686	69
3	50	9	0,16	1,44	8,20	0,120	0,984	68
4	55	9	0,26	2,34	10,30	0,160	1,648	70
5	60	9	0,37	3,33	12,07	0,190	2,2933	69
6	65	9	0,55	4,95	13,99	0,220	3,0778	62
7	70	9	0,82	7,38	15,86	0,250	3,965	54
8	75	9	1,20	10,8	16,6	0,26	4,316	40
9	80	9	1,74	15,66	11,2	0,17	1,904	12

D. Perhitungan Power losses

Power losses pada beban 39 Ω , 47 Ω , dan 61 Ω dengan *duty cycle* 50% $V=6V$

1. Penentuan V_{out}

$$V_{out} = 6 \frac{0,5}{(1 - 0,5)} = 6 V$$

2. Penentuan I_{out}

$$R_{39} \rightarrow I_{out} = \frac{6}{39} = 0.1538 A$$

$$R_{47} \rightarrow I_{out} = \frac{6}{47} = 0.1277 A$$

$$R_{61} \rightarrow I_{out} = \frac{6}{61} = 0.0984 A$$

3. Penentuan I_{in}

$$R_{39} \rightarrow I_{in} = \frac{0.5 * 0.1538}{1-0.5} = 0.1538 A$$

$$R_{47} \rightarrow I_{in} = \frac{0.5 * 0.127}{1-0.5} = 0.127 A$$

$$R_{61} \rightarrow I_{in} = \frac{0.5 * 0.0984}{1-0.5} = 0.0984 A$$

4. Penentuan daya keluaran

$$D_{39} \rightarrow P_{out} = 6 \times 0.1538 = 0.923 W$$

$$D_{47} \rightarrow P_{out} = 6 \times 0.127 = 0.766 W$$

$$D_{61} \rightarrow P_{out} = 6 \times 0.0984 = 0.5902 W$$

5. Arus RMS pada induktor 1 dan 2

$$I_{L1rms} (39) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0.1538 = 0,1776 A$$

$$I_{L1rms} (47) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0.127 = 0.1474 A$$

$$I_{L1rms} (61) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,0984 = 0.1136 A$$

- 39 $\rightarrow Pr_{L1} = RL1 * I_{L1rms} = 0,183 * 0,1776 = 0,0325 W$
- 47 $\rightarrow Pr_{L1} = RL1 * I_{L1rms} = 0,183 * 0.1474 = 0,027 W$
- 61 $\rightarrow Pr_{L1} = RL1 * I_{L1rms} = 0,183 * 0.1136 = 0,0208 W$

$$I_{L2rms} (39) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0.1259 = 0,1776 A$$

$$I_{L2rms} (47) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,127 = 0.1474 A$$

$$I_{L2rms} (61) = \frac{2}{\sqrt{3}} * 0,0984 = 0.1136 A$$

- 39 $\rightarrow Pr_{L2} = RL2 * I_{L2rms} = 0.183 * 0,1776 = 0,0325 W$

- 47 $\rightarrow P_{rL2} = R_{L2} * I_{L2rms} = 0,183 * 0,1474 = 0,027 \text{ W}$
- 61 $\rightarrow P_{rL2} = R_{L2} * I_{L2rms} = 0,183 * 0,1136 = 0,0208 \text{ W}$

6. Total power losses mosfet

$$39 \rightarrow I_{rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,1538 + 0,1538) = 0,3553 \text{ A}$$

$$47 \rightarrow I_{rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,127 + 0,127) = 0,2948 \text{ A}$$

$$61 \rightarrow I_{rms} = \frac{2}{\sqrt{3}} (0,0984 + 0,0984) = 0,2272 \text{ A}$$

$$P_{cond} (39) = R_{ds} * I_{rms}^2 = 0,02 * 0,3553 = 0,0025 \text{ W}$$

$$P_{cond} (47) = R_{ds} * I_{rms}^2 = 0,02 * 0,2948 = 0,0017 \text{ W}$$

$$P_{cond} (61) = R_{ds} * I_{rms}^2 = 0,02 * 0,2272 = 0,001 \text{ W}$$

$$P_{sw} (39) = F_s * C_o * V_{sm}^2 = 124 * 10^3 * 560 * 10^{-12} (6+6)^2 = 0,01 \text{ W}$$

$$P_{sw} (47) = F_s * C_o * V_{sm}^2 = 124 * 10^3 * 560 * 10^{-12} (6+6)^2 = 0,01 \text{ W}$$

$$P_{sw} (61) = F_s * C_o * V_{sm}^2 = 124 * 10^3 * 560 * 10^{-12} (6+6)^2 = 0,01 \text{ W}$$

$$P_{mosfet} (39) = 0,0025 + 0,01 = 0,0125 \text{ W}$$

$$P_{mosfet} (47) = 0,0017 + 0,01 = 0,0117 \text{ W}$$

$$P_{mosfet} (61) = 0,001 + 0,01 = 0,0011 \text{ W}$$

7. Daya saat dioda konduksi,

- 39

$$P_{RF} = 0,175 * \left(\frac{0,1538}{\sqrt{1-0,5}}\right)^2 = 0,0381 \text{ W}$$

$$P_{VF} = 0,525 * 0,1538 = 0,0808 \text{ W}$$

- 47

$$P_{RF} = 0,175 * \left(\frac{0,127}{\sqrt{1-0,5}}\right)^2 = 0,0316 \text{ W}$$

$$P_{VF} = 0,525 * 0,127 = 0,067 \text{ W}$$

- 61

$$P_{RF} = 0,175 * \left(\frac{0,0984}{\sqrt{1-0,5}}\right)^2 = 0,0243 \text{ W}$$

$$P_{VF} = 0,525 * 0,188 = 0,0516 \text{ W}$$

$$PD (39) = 0,0381 + 0,0808 = 0,1189 \text{ W}$$

$$PD (47) = 0,0316 + 0,067 = 0,0986 \text{ W}$$

$$PD (61) = 0,0516 + 0,0243 = 0,076 \text{ W}$$

8. Daya yang dihasilkan oleh resistor internal kapasitor filter

$$C_{in} \rightarrow P_{rcin} (39) = 0,1538 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 0,027 = 0,0006 \text{ W}$$

$$C_{in} \rightarrow P_{rcin} (47) = 0,127 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 0,027 = 0,0004 \text{ W}$$

$$C_{in} \rightarrow P_{rcin} (61) = 0,0984 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 0,027 = 0,0003 \text{ W}$$

$$P_{rcs} (39) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,1538 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 2,88 \right) = 0,0909 \text{ W}$$

$$P_{rcs} (47) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,127 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 2,88 \right) = 0,0626 \text{ W}$$

$$P_{rcs} (61) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} 0,0984 \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}}^2 * 2,88 \right) = 0,0372 \text{ W}$$

- C_{out}

$$I_{crms} = I_{out};$$

$$39 \text{ ohm, } P_{cout} = (0,1538 * \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}})^2 * 0,043 = 0,001 \text{ W}$$

$$47 \text{ ohm, } P_{cout} = (0,127 * \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}})^2 * 0,043 = 0,0007 \text{ W}$$

$$61 \text{ ohm, } P_{cout} = (0,098 * \sqrt{\frac{0,5}{(1-0,5)}})^2 * 0,043 = 0,0004 \text{ W}$$

9. Total disipasi daya (*power losses*)

$$PLS = P_{cond} + P_{sw} + P_{rL1} + P_{rL2} + PD + P_{rcin} + P_{rcs} + P_{rcout}$$

- $R = 39 \text{ ohm}$

$$PLS = 0,01 + 0,0025 + 0,0325 + 0,0325 + 0,1188 + 0,0006 + 0,0909 + 0,001 = 0,2889 \text{ W}$$

- $R = 47 \text{ ohm}$

$$PLS = 0,0017 + 0,01 + 0,027 + 0,027 + 0,0986 + 0,0004 + 0,0626 + 0,0007 = 0,228 \text{ W}$$

- $R = 61 \text{ ohm}$

$$PLS = 0,001 + 0,01 + 0,0208 + 0,0208 + 0,076 + 0,0003 + 0,0372 + 0,0004 = 0,1664 \text{ W}$$

10. Efisiensi SEPIC *converter*

$$\eta = \frac{0.9231}{0.9231 + 0.2889} 100\% = 76 \%$$

$$\eta = \frac{0.766}{0.766 + 0.228} 100\% = 77\%$$

$$\eta = \frac{0.5902}{0.5902 + 0.1664} 100\% = 78\%$$

E. Datasheet Tegangan Modul TEG

Tcold/Thot		Suhu Panas															
		50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Suhu Panas	30	1,5	2,4	3,3	4,2	5,1	6,0	6,9	7,8	8,7	9,6	10,5	11,4	12,3	13,2	14,1	15,0
	40	0,8	1,7	2,6	3,5	4,4	5,3	6,2	7,1	8,0	8,9	9,8	10,7	11,6	12,5	13,4	14,3
	50	0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9,0	9,9	10,8	11,7	12,6	13,5
	60	0	0,2	1,1	2,0	2,9	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1	11,0	11,9	12,8
	70	0	0	0,3	1,2	2,1	3,0	3,9	4,8	5,7	6,6	7,5	8,4	9,3	10,2	11,1	12,0
	80	0	0	0	0,5	1,4	2,3	3,2	4,1	5,0	5,9	6,8	7,7	8,6	9,5	10,4	11,3
	90	0	0	0	0	0,6	1,5	2,4	3,3	4,2	5,1	6,0	6,9	7,8	8,7	9,6	10,5
	100	0	0	0	0	0	0,8	1,7	2,6	3,5	4,4	5,3	6,2	7,1	8,0	8,9	9,8
	110	0	0	0	0	0	0	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9,0
	120	0	0	0	0	0	0	0,2	1,1	2,0	2,9	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3
130	0	0	0	0	0	0	0	0,3	1,2	2,1	3,0	3,9	4,8	5,7	6,6	7,5	

F. Datasheet Arus Modul TEG

Tcold/Thot		Suhu Panas															
		50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Suhu Dingin	30	0,20	0,31	0,42	0,53	0,64	0,75	0,86	0,97	1,08	1,19	1,30	1,41	1,52	1,63	1,74	1,85
	40	0,10	0,21	0,32	0,43	0,54	0,65	0,76	0,87	0,98	1,09	1,20	1,31	1,42	1,53	1,64	1,75
	50	0	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	0,99	1,10	1,21	1,32	1,43	1,54	1,65
	60	0	0,01	0,12	0,23	0,34	0,45	0,56	0,67	0,78	0,89	1,00	1,11	1,22	1,33	1,44	1,55
	70	0	0	0,02	0,13	0,24	0,35	0,46	0,57	0,68	0,79	0,90	1,01	1,12	1,23	1,34	1,45
	80	0	0	0	0,03	0,14	0,25	0,36	0,47	0,58	0,69	0,80	0,91	1,02	1,13	1,24	1,35
	90	0	0	0	0	0,04	0,15	0,26	0,37	0,48	0,59	0,70	0,81	0,92	1,03	1,14	1,25
	100	0	0	0	0	0	0,05	0,16	0,27	0,38	0,49	0,60	0,71	0,82	0,93	1,04	1,15
	110	0	0	0	0	0	0	0,06	0,17	0,28	0,39	0,50	0,61	0,72	0,83	0,94	1,05
	120	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,18	0,29	0,40	0,51	0,62	0,73	0,84	0,95
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,19	0,30	0,41	0,52	0,63	0,74	0,85	

G. Datasheet Efisiensi Modul TEG

Tcold/Thot		Suhu Panas																
		50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
Suhu Dingin	30	2%	3%	4%	4%	5%	5%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	
	40	1%	2%	3%	3%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	
	50	0%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	6%	6%	6%	
	60	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	4%	4%	6%	5%	5%	5%	5%	
	70	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	5%	5%	
	80	0%	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	
	90	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	4%	
	100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%
	110	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	3%	3%
	120	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%
130	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	

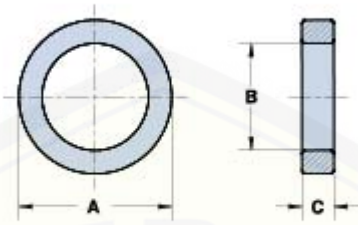
H. Listing Program MPPT InC

```
void mppt() {
    if (dV == 0) {
        if (dI == 0)
            {return; }
        if (dI != 0) {
            if (dI > 0) {
                pwm -= delta_duty1;
                tulis_pwm();
                teg_sebelum = volt_in; //update nilai tegangan
                arus_sebelum = current_in / 1000; //update nilai daya
                return; }
            if ((dI < 0)) {
                pwm += delta_duty2;
                tulis_pwm();
                teg_sebelum = volt_in; //update nilai tegangan
                arus_sebelum = current_in / 1000; //update nilai daya
                return; }
            }
        }
    if (dV != 0) {
        if ((dI / dV) == (-(arus_sekarang / teg_sekarang))) {
            return; }
        if ((dI / dV) != (-(arus_sekarang / teg_sekarang))) {
            if ((dI / dV) > (-(arus_sekarang / teg_sekarang))) {
                pwm += delta_duty2;
                tulis_pwm();
                teg_sebelum = volt_in; //update nilai tegangan
```

```
    arus_sebelum = current_in / 1000; //update nilai daya
    return; }
if ((dI / dV) < (-(arus_sekarang / teg_sekarang))) {
    pwm -= delta_duty1;
    tulis_pwm();
    teg_sebelum = volt_in; //update nilai tegangan
    arus_sebelum = current_in / 1000; //update nilai daya
    return;}
}
}
}
```

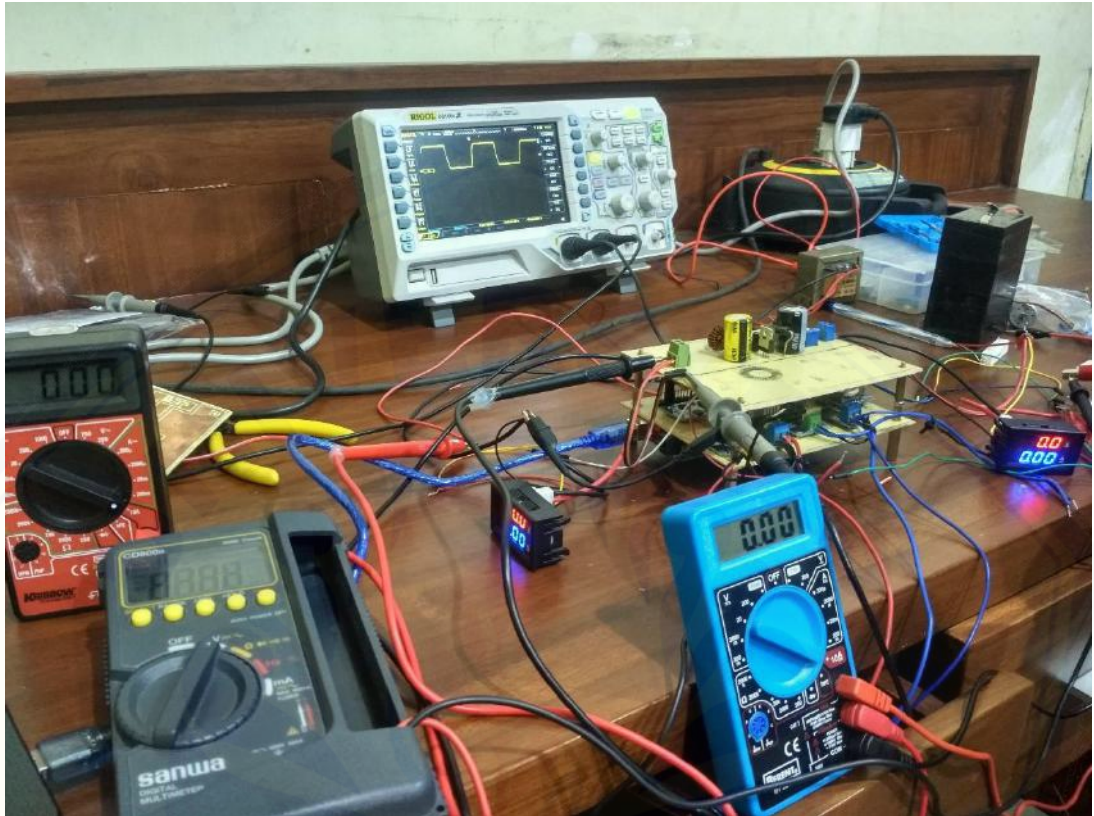


I. Spesifikasi Toroid

Physical Dimensions	
	
OD(A) = 0.5 in / 12.7 mm +/- 0.25 mm ID(B) = 0.281 in / 7.15 mm +/- 0.20 mm Ht(C) = 0.188 in / 4.9 mm +/- 0.25 mm	
$A_L = 440 \pm 20\%$ $\mu H = (A_L * Turns^2) / 1000$ Actual measured AL using 10 turns #28 wire	
Temperature Stability (ppm / °C) = 12500	
Color Code = shiny black	
Application Freq Range Wideband Transformers 5 - 400 MHz Power Transformers 0.5 - 30 MHz RFI Suppression 5 - 500 MHz	



J. Dokumentasi Penelitian





Konverter SEPIC dan datalogger



Bagian dalam TEG



Pengujian Generator