



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE  
SISTEM DAYA TELEPON SELULAR  
BERBASIS RF ENERGY HARVESTING  
DAN SEL SURYA**

**SKRIPSI**

Oleh

**AZLUL FADHLY OKA**

NPM. 0706267566

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE  
SISTEM DAYA TELEPON SELULAR  
BERBASIS RF ENERGY HARVESTING  
DAN SEL SURYA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana**

**AZLUL FADHLY OKA**

NPM. 0706267566

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Azlul Fadhly Oka

NPM : 0706267566

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Azlul Fadhly Oka

NPM : 0706267566

Program studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Rancang Bangun Prototipe Sistem Daya Telepon Selular Berbasis  
RF Energy Harvesting dan Sel Surya

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelas Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati M.T. (.....)

Penguji 1 : Dr. Abdul Muis ST, M.Eng, (.....)

Penguji 2 : Dr. Abdul Halim M.Eng, (.....)

Ditetapkan di: Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

# LEMBAR PERSETUJUAN

Skripsi dengan judul :

## **RANCANG BANGUN PROTOTIPE SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS RF ENERGY HARVESTING DAN SEL SURYA**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, 4 Juli 2011

Dosen Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati M.T.

NIP : 196101241986022001

## UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, puji dan syukur hanya pantas penulis panjatkan kehadiran Allah Azza wa Jalla atas rahmat dan ridho-Nya sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi yang berjudul Rancang Bangun Prototipe Sistem Daya Telepon Selular Berbasis RF *Energy Harvesting* dan Sel Surya.

Skripsi ini dapat terselesaikan atas bantuan serta dukungan banyak pihak. Untuk itu, dengan segenap ketulusan hati penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibunda dan kakak penulis terkasih atas doa dan dukungannya yang tanpa batas.
2. Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, M.T selaku pembimbing skripsi.
3. Muhammad Rifki N., Irwan Sukma Darmawan dan Mohamad Taufik untuk segala masukan, semua bantuan dan dukungannya kepada penulis selama perjuangan ini.
4. Abdullah Umar, Arriyadhul Qolbi, Bayu B.S., dan Ade Yurianto untuk semua bantuannya dalam pengerjaan skripsi ini.
5. Daryanto, Anne W., Rudi S., Rhyando A.A., Rizky A.T.A, dan teman-teman di AMRG (*Antenna and Microwace Research Group*) DTE FT UI untuk bantuan dan dukungannya dalam pengerjaan antenna dan simulasi RF.
6. Novri Ichsan D., Ade Hidayat, Danang T., Rizky P.A, Edy Sofian dan semua teman-teman Teknik Elektro dan Teknik Komputer angkatan 2007 yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu untuk semua bantuannya selama 4 tahun ini.
7. Juga kepada semua pihak yang telah membantu terselesainya skripsi ini.

Akhir kata semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi semuanya.

Depok, 4 Juli 2011

Penulis,



Azlul Fadhly Oka

NPM 0706267566

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI**  
**SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Azlul Fadhly Oka

NPM : 0706267566

Program studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Nonoksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE**  
**SISTEM DAYA TELEPON SELULAR**  
**BERBASIS RF ENERGY HARVESTING**  
**DAN SEL SURYA**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemegang Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

**Dibuat di : Depok**

**Pada tanggal : 4 Juli 2011**

**Yang menyatakan**

Azlul Fadhly Oka

## ABSTRAK

Nama : Azlul Fadhly Oka  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Rancang Bangun Prototipe Sistem Daya Telepon Selular  
Berbasis RF *Energy Harvesting* dan Sel Surya

Penggunaan sel surya sebagai sumber catu daya bagi divais elektronik masih dibatasi cuaca dan pergantian siang malam. Di lain pihak, meskipun sangat menjanjikan, pemanfaatan energi dari sinyal RF (*Radio Frequency*) masih dibatasi rendahnya level daya yang tersedia. Penggunaan dua sumber ini sebagai sumber catu daya bagi satu divais elektronik berpotensi menghasilkan sumber catu daya yang mendukung *portability*, *mobility* dan *availability*. Sistem RF *energy harvesting* dari sinyal RF frekuensi GSM 900 MHz menggunakan rangkaian *voltage multiplier* sebagai *rectifier* dan *amplifier*. Sistem *charger* berbasis sel surya menggunakan rangkaian *voltage regulator* untuk menghasilkan nilai tegangan yang stabil. Tegangan DC digunakan untuk men-*charging* baterai *handphone*.

Kata kunci: catu daya, *charging*, tegangan

## ABSTRACT

Name : Azlul Fadhly Oka  
StudyProgramme : Electrical Engineering  
Title : Design of RF Energy Harvesting System and Solar Cell  
Based-Power Supply System for Mobile Phone Charging  
Process

Solar cell-based electronic applications are still limited by the availability of sunlight during the day time. While this is not a problem for RF (Radio Frequency) energy, it's low power availability in the free space is the major issue that most applications must deal with. Using these two ambient energy sources to power the same device could lead to power sources that support portability and mobility applications. This thesis proposes a design of RF energy harvesting system from 900 MHz GSM signal with voltage multiplier circuit to rectify and amplify the input signal. The solar cell-based system with voltage regulator is required in the system to produce a stable value of DC voltage from solar cell. The produced DC voltage will be used to charge a mobile phone.

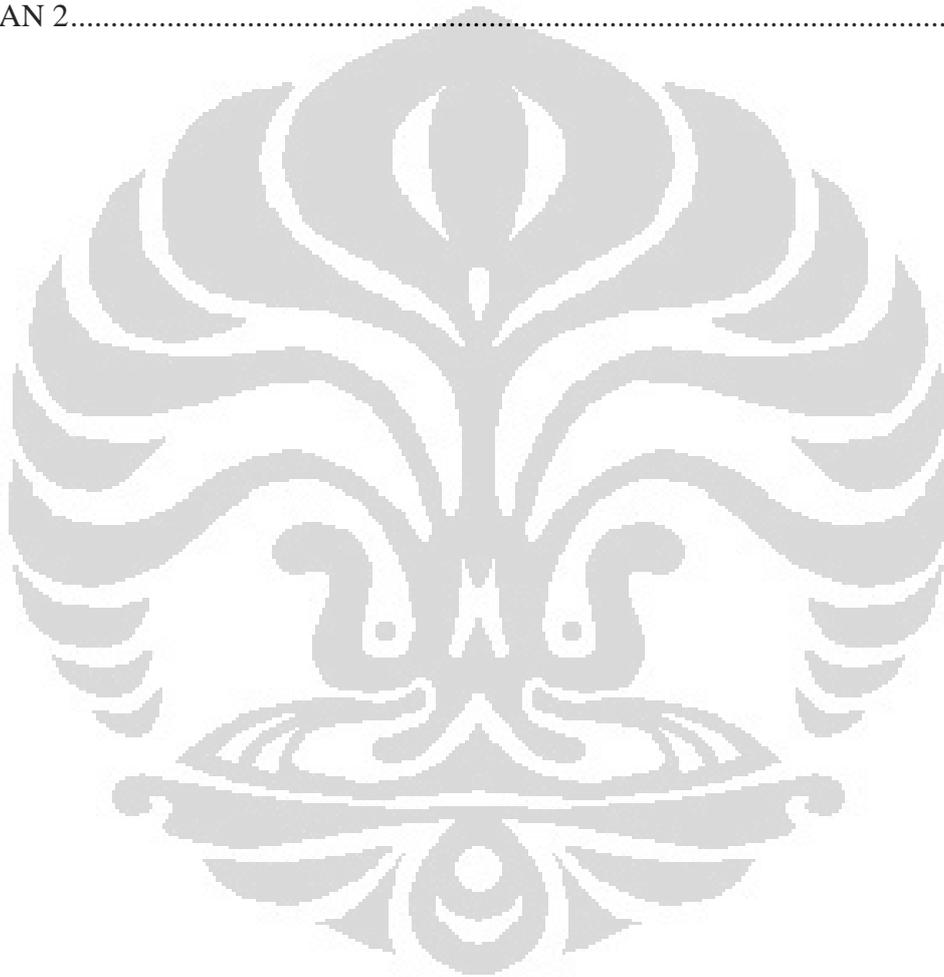
Keywords: power, charging, voltage

# DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN .....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG .....	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH .....	2
1.3. TUJUAN .....	3
1.4. BATASAN MASALAH.....	3
1.5. SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
BAB II DASAR TEORI .....	4
2.1. SINYAL FREKUENSI RADIO.....	4
2.2. SEL SURYA.....	8
2.2.1. PRINSIP KERJA SEL SURYA.....	8
2.2.2. PARAMETER SEL SURYA.....	11
2.2.2.1. Kurva Karakteristik I-V Sel Surya.....	11
2.2.2.2. Short-Circuit Current ( $I_{sc}$ ).....	12
2.2.2.3. Open-Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ) .....	12
2.2.2.4. Fill Factor (FF).....	13
2.2.2.5. Efisiensi ( $\eta$ ).....	14
2.3. ANTENA .....	15
2.3.1. DEFINISI ANTENA.....	15
2.3.2. AREA MEDAN JAUH DAN MEDAN DEKAT.....	15
2.3.3. PARAMETER UNJUK KERJA ANTENA .....	17
2.3.4. JENIS ANTENA.....	19
2.3.4.1. Antena Monopole.....	19
2.3.4.2. Antena Dipole .....	21

2.4. CHARGE PUMP .....	22
2.5. VOLTAGE REGULATOR.....	25
2.5.1. LINEAR VOLTAGE REGULATOR .....	25
2.5.1.1. Prinsip Kerja .....	26
2.5.1.2. Jenis-jenis Regulator Linear .....	28
2.5.2. BOOST CONVERTER.....	29
2.6. PRINSIP CHARGING BATERAI LI-ION.....	31
<b>BAB III PERANCANGAN SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS RF ENERGY HARVESTING DAN SEL SURYA.....</b>	<b>34</b>
3.1. RANCANGAN SISTEM RF ENERGY HARVESTING.....	35
3.1.1. ANTENA .....	35
3.1.2. RANGKAIAN CHARGE PUMP .....	36
3.1.2.1. Pemilihan Jumlah Stage.....	37
3.1.2.2. Pemilihan Jenis Dioda.....	38
3.1.2.3. Pemilihan Nilai Kapasitor.....	38
3.1.3. RANGKAIAN STEP-UP CONVERTER.....	39
3.2. RANCANGAN SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS SEL SURYA...41	
3.2.1. PANEL SURYA .....	41
3.2.1. VOLTAGE REGULATOR.....	41
3.3. SPESIFIKASI DAYA HANDPHONE LG KG-207 .....	44
<b>BAB IV SIMULASI .....</b>	<b>46</b>
4.1. SIMULASI SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS RF ENERGY HARVESTING .....	46
4.2. SIMULASI SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS BERBASIS SEL SURYA.....	50
<b>BAB V UJI COBA DAN ANALISIS .....</b>	<b>54</b>
5.1. SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS RF ENERGY HARVESTING GSM 900 MHZ.....	54
5.1.1. UJI COBA.....	54
5.1.1.1. Uji Coba dengan Sumber <i>Network Analyzer</i> .....	55
5.1.1.2. Uji Coba dengan Sumber BTS.....	56
5.1.2. ANALISIS HASIL UJI COBA .....	57
5.1.2.1. Analisis Dioda.....	57
5.1.2.2. Analisis Antena .....	58
5.1.2.3. Analisis Substrate Losses.....	60
5.1.2.4. Perbaikan yang Bisa Dilakukan .....	60
5.2. SISTEM DAYA TELEPON SELULAR BERBASIS SEL SURYA.....	62
5.2.1. UJI COBA.....	62

5.2.2. ANALISIS HASIL UJI COBA .....	63
5.2.2.1. Analisis Karakteristik Sel Surya .....	63
5.2.2.2. Analisis Unjuk Kerja Voltage Regulator .....	65
5.2.2.3. Analisis Waktu <i>Charging</i> .....	69
5.2.2.4. Analisis Efisiensi.....	72
BAB VI KESIMPULAN .....	73
DAFTAR ACUAN .....	75
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN 1.....	80
LAMPIRAN 2.....	90



## DAFTAR GAMBAR

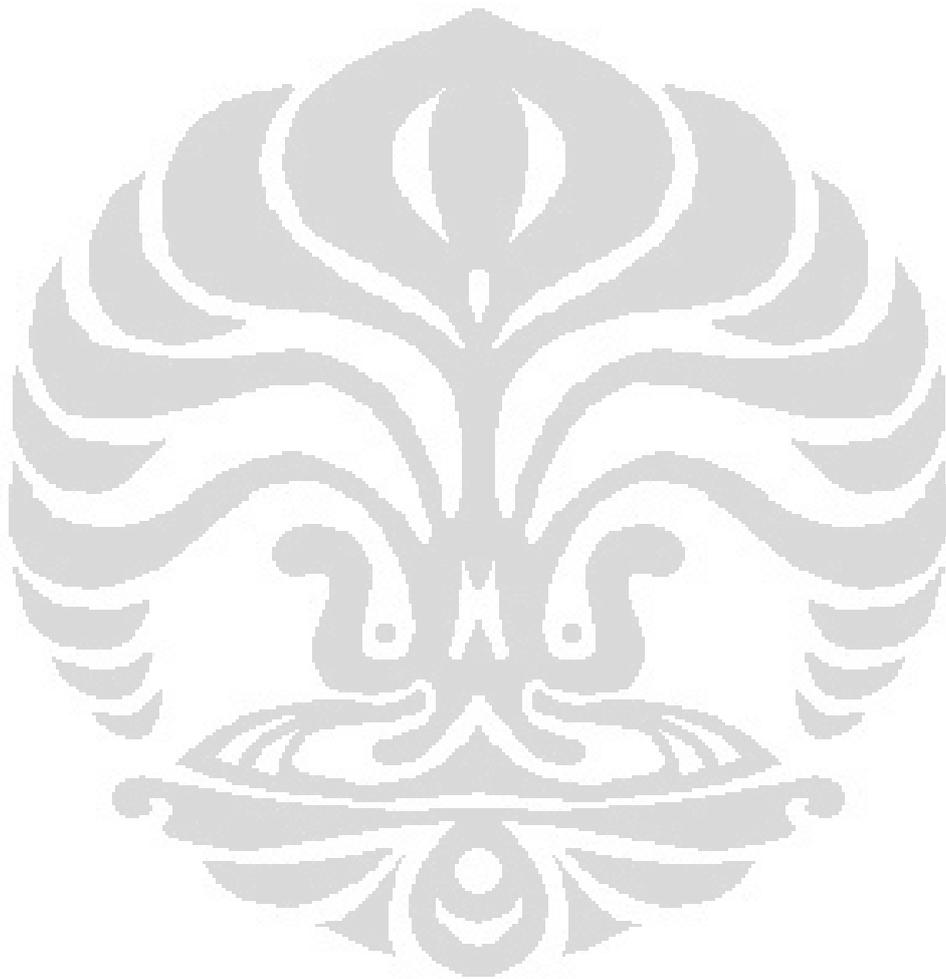
Gambar 2.1 Beberapa contoh sumber sinyal RF di sekitar masyarakat .....	4
Gambar 2.2 Proses Pada Panel Surya .....	9
Gambar 2.3 Kurva karakteristik I-V pada sel surya.....	11
Gambar 2.4 Kurva I-V menunjukkan arus <i>short-circuit</i> .....	12
Gambar 2.5 Kurva I-V menunjukkan dan tegangan <i>open-circuit</i> .....	13
Gambar 2.6 Titik daya, tegangan, dan arus maksimum pada kurva I-V sel surya untuk menunjukkan <i>fill factor</i> .....	14
Gambar 2.7 Area radiasi di sekitar antena .....	16
Gambar 2.8 Antena <i>monopole</i> .....	20
Gambar 2.9 Pola radiasi antena <i>monopole</i> .....	20
Gambar 2.10 Antena dipole setengah gelombang.....	21
Gambar 2.11 Pola radiasi antena dipole setengah gelombang.....	22
Gambar 2.12 Skema rangkaian <i>voltage doubler 1 stage</i> .....	23
Gambar 2.13. Bentuk gelombang rangkaian <i>voltage doubler</i> .....	24
Gambar 2.14 Skema prinsip kerja sebuah regulator linear .....	26
Gambar 2.15 Skema rangkaian dasar sebuah regulator linear .....	27
Gambar 2.16 Perbedaan karakteristik ketiga jenis regulator linear .....	29
Gambar 2.17 Rangkaian dasar sebuah <i>boost converter</i> .....	30
Gambar 2.18 Cara kerja rangkaian <i>boost converter</i> .....	30
Gambar 2.19 Tahapan <i>charging</i> baterai Li-ion .....	32
Gambar 3.1 Blok diagram rancangan sistem <i>energy harvesting</i> .....	34
Gambar 3.2 Antena dipole yang digunakan dalam sistem.....	36
Gambar 3.3 Rangkaian <i>charge pump</i> Dickson dengan <i>5-stages</i> .....	37
Gambar 3.4 Bentuk dan pin-pin pada TPS61222 .....	39
Gambar 3.5 Blok diagram fungsional TPS61222 .....	40
Gambar 3.6 Skema rangkaian pemakaian TPS61222.....	40
Gambar 3.7 IC <i>voltage regulator</i> seri AN78xx.....	42
Gambar 3.8 Blok diagram AN78xx .....	43
Gambar 3.9 Rangkaian pemakaian AN78xx.....	43

Gambar 3.10 <i>Handphone</i> dan baterai Li-ion produksi LG pada <i>handphone</i> LG KG-207	.....44
Gambar 4.1 Simulasi rangkaian <i>voltage multiplier</i> 3-stages dengan gelombang AC 900MHz	.....48
Gambar 4.2 Analisa transient rangkaian <i>voltage multiplier</i> 3-stages dengan gelombang AC 900 MHz	.....48
Gambar 4.3 Simulasi rangkaian <i>voltage multiplier</i> 5-stages dengan gelombang AC 900MHz	.....49
Gambar 4.4 Analisa transient rangkaian <i>voltage multiplier</i> 5-stages dengan gelombang AC 900 MHz	.....49
Gambar 4.5 Gambar rangkaian uji <i>voltage regulator</i> 5 V tanpa beban	.....52
Gambar 4.6 Hasil simulasi <i>voltage regulator</i> 5 V tanpa beban	.....52
Gambar 4.7 Gambar rangkaian uji <i>voltage regulator</i> 5 V dengan beban	.....53
Gambar 4.8 Hasil simulasi <i>voltage regulator</i> 5 V dengan beban	.....53
Gambar 5.1 Dioda HSMS 2820	.....55
Gambar 5.2 Rangkaian <i>voltage multiplier</i> 5-stages	.....55
Gambar 5.3 Hasil uji coba <i>voltage multiplier</i> 5-stages dengan sumber BTS	.....56
Gambar 5.4 Susunan pengujian	.....63
Gambar 5.5 Grafik hubungan $V_{oc}$ terhadap waktu dari uji coba 1	.....64
Gambar 5.6 Grafik hubungan $I_{sc}$ terhadap waktu dari uji coba 2	.....65
Gambar 5.7 Grafik unjuk kerja <i>voltage regulator</i> terhadap waktu dari uji coba 3	.....66
Gambar 5.8 Grafik unjuk kerja <i>voltage regulator</i> terhadap waktu dari uji coba 4	.....67
Gambar 5.9 Grafik unjuk kerja <i>voltage regulator</i> terhadap waktu dari uji coba 5	.....66
Gambar 5.10 Grafik unjuk kerja <i>voltage regulator</i> terhadap waktu dari uji coba 6	.....67
Gambar 5.11 Grafik perbandingan waktu charging saat kondisi awal baterai terisi 25 %	.....70
Gambar 5.12 Grafik perbandingan waktu charging saat kondisi awal baterai terisi 50 %	.....71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik <i>charging</i> pada baterai Li-ion .....	33
Tabel 3.1 Data kelistrikan modul sel surya SWISSCO SOLAR STP0055S12/Db .....	41
Tabel 4.1 Parameter SPICE dioda Schottky HSMS 2820.....	47





# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. LATAR BELAKANG

Banyak orang yang tidak menyadari betapa melimpahnya sumber energi yang tersedia di sekeliling kita disepanjang waktu. Jenis sumber energi atau *ambient source* yang ada di sekitar kita antara lain angin, solar, getaran (*vibration*), elektromagnetik, perubahan temperatur, *thermoelectric*, tekanan, akustik, *Radio Frequency* ( RF ) dan lain-lain. Diantara jenis sumber energi ini, energi yang bersumber dari matahari adalah jenis sumber energi yang teknologinya paling berkembang, hal ini tidak hanya dikarenakan perkembangan teknologi semikonduktor yang mendasari pemanfaatan energi surya yang sangat pesat namun juga fakta bahwa matahari merupakan sumber energi ‘gratis’, ramah lingkungan dan ketersediaannya terjamin selama matahari masih bersinar, sehingga menjadi alternatif yang menjanjikan menggantikan sumber energi konvensional.

Pemanfaatan sumber energi surya sebagai catu daya dalam perangkat elektronik bukanlah hal baru, namun pemanfaatan energi matahari dalam divais elektronik yang mendukung *mobility*, *portability* dan *availability* sepanjang waktu masih sangat terbatas. Hal ini terutama dikarenakan sumber matahari yang dibatasi oleh cuaca dan pergantian siang malam, sehingga aplikasi elektronik berbasis sel surya tidak dapat diandalkan di lokasi yang ketersediaan cahaya matahari terbatas. Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggabungkan sumber energi matahari dengan sumber energi *ambient* lain sebagai alternatif catu daya divais elektronik yang mendukung *mobility*, *portability* dan *availability* sepanjang waktu.

Salah satu sumber energi yang menjanjikan sebagai paduan sumber energi surya yang mendukung *mobility*, *portability* dan *availability* sepanjang waktu adalah sumber energi berupa energi elektromagnetik yang terdapat dalam gelombang frekuensi radio ( *Radio Frequency / RF waves* ) dan banyak digunakan dalam berbagai teknologi yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia

modern. Radio, televisi, satelit, *wireless LAN* dan telepon seluler adalah beberapa contoh teknologi yang selalu lekat dengan kehidupan manusia modern dan kesemuanya menggunakan energi elektromagnetik RF dalam operasinya. Pemancar stasiun radio dan televisi, pemancar sinyal RF untuk komunikasi seluler, sinyal RF yang ditransmisikan satelit maupun yang dihasilkan *handphone* merupakan sumber-sumber energi elektromagnetik yang tersedia dua puluh empat jam dan mencakup area yang relatif luas, terutama di daerah urban. Secara teoritis, jika energi yang sangat melimpah ini bisa dimanfaatkan, maka akan didapatkan sumber energi alternatif yang tersedia terus menerus dan tersedia di mana saja dan berpotensi menjawab kebutuhan dunia akan sumber energi yang bisa menunjang *mobility, portability, availability* sepanjang waktu dan terlebih lagi memungkinkan *wireless energy transfer*.

Sistem *energy harvesting* yang diimplementasikan dalam skripsi ini terdiri atas sistem RF *energy harvesting* dan sistem berbasis sel surya. Sistem RF *energy harvesting* akan menangkap sinyal RF pada frekuensi GSM 900 MHz menggunakan antena *receiver*, kemudian sinyal RF diubah menjadi tegangan DC dengan rangkaian *charge pump* yang sekaligus berfungsi sebagai penguat (*amplifier*). Sebelum tegangan DC yang dihasilkan disuplai ke baterai perangkat elektronik (*handphone*), diperlukan rangkaian *boost regulator* untuk menaikkan level tegangan dan meregulasi tegangan yang dihasilkan pada nilai yang konstan, sedangkan sistem berbasis energi surya terdiri atas panel surya sebagai perangkat yang mengonversi energi foton menjadi daya DC, kemudian daya ini akan diregulasi menggunakan *voltage regulator* untuk mendapatkan nilai tegangan konstan yang sesuai dengan spesifikasi baterai *handphone*.

## 1.2. PERUMUSAN MASALAH

Di dalam skripsi ini penulis mencoba mengimplementasikan teknologi *energy harvesting* untuk mengkonversi energi yang terdapat dalam sinyal RF frekuensi GSM 900 MHz menjadi tegangan DC kemudian dikombinasikan dengan sistem berbasis sel surya untuk proses *charging* pada baterai *handphone*. Adapun permasalahan yang ingin diteliti sebagai berikut :

1. Membuktikan prinsip *RF energy harvesting* bisa digunakan untuk mengonversi sinyal RF frekuensi GSM 900 MHz menjadi tegangan DC.
2. Perancangan sistem *RF energy harvesting* yang terdiri atas antena, *charge pump* dan *boost regulator* untuk mengonversi sinyal RF frekuensi GSM 900 MHz menjadi tegangan DC.
3. Perancangan sistem *charging handphone* berdasarkan sel surya dan *voltage regulator*.
4. Memanfaatkan tegangan DC yang dihasilkan sistem *RF energy harvesting* dan sistem berbasis sel surya untuk *men-charging handphone*.

### 1.3. TUJUAN

Dengan skripsi ini diharapkan dapat dibuat rancang bangun sistem daya yang mampu mengkonversi sinyal RF GSM 900 MHz menjadi tegangan DC dan rancang bangun sistem daya berbasis sel surya yang dapat digunakan untuk *men-charging* baterai *handphone*.

### 1.4. BATASAN MASALAH

Skripsi ini dibatasi untuk perancangan, pembuktian, realisasi, pengujian dan analisa sistem *RF energy harvesting* dan sistem berbasis sel surya untuk proses *charging* baterai *handphone*.

### 1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan pada laporan skripsi ini dibagi dalam enam bab. Bab pertama merupakan pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab kedua membahas dasar-dasar teori yang mendasari perancangan sistem, seperti sinyal RF, sel surya, antena, *charge pump* dan *voltage regulator*. Bab ketiga berisi perancangan sistem yang akan diuji berdasarkan blok diagram, antara lain antena, *voltage multiplier*, *boost regulator*, panel surya dan *voltage regulator*. Adapun bab keempat membahas simulasi sistem yang diajukan dan bab kelima membahas uji coba dan analisa hasil uji coba sistem. Bab keenam berisi kesimpulan.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1. SINYAL FREKUENSI RADIO

Sinyal radio frekuensi atau *Radio Frequency ( RF ) signal* adalah gelombang radiasi elektromagnetik yang berpropagasi (memancar dengan arah tertentu) di udara ( *space* ) pada alokasi frekuensi yang berkisar antara 30 Hz sampai 300 GHz [1]. Sinyal RF terutama banyak digunakan dalam teknologi komunikasi dan transmisi data. Alokasi penggunaan *range* frekuensi untuk transmisi sinyal RF berbeda-beda untuk tiap aplikasi teknologi komunikasi, misalnya saja untuk transmisi radio digunakan *range* frekuensi 30 - 300 MHz, untuk transmisi stasiun televisi digunakan *Ultra High Frequency ( UHF )* dengan *range* frekuensi 0,3 - 3 GHz, untuk komunikasi selular GSM ( *Global System for Mobile* ) digunakan frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz, dan frekuensi 2,4 GHz untuk transmisi *wireless LAN ( Local Area Network )*. Gambar 2.1 memperlihatkan beberapa contoh sumber sinyal RF di sekitar masyarakat.



Gambar 2.1 Beberapa contoh sumber sinyal RF di sekitar masyarakat [2]

Beberapa contoh aplikasi teknologi RF yang disebutkan di Gambar 2.1 merupakan teknologi yang sangat banyak digunakan oleh masyarakat, terutama di daerah urban. Sumber-sumber sinyal RF untuk tiap aplikasi tersebut pun dapat

dengan mudah dan banyak ditemui, seperti pemancar radio, pemancar stasiun televisi BTS ( *Base Transceiver Station* ) untuk komunikasi selular, transmiter untuk *wireless internet*, bahkan *handphone* dan berbagai peralatan elektronik berbasis RF pun merupakan sumber sinyal RF yang potensial. Tanpa disadari, seiring dengan peningkatan kebutuhan masyarakat akan teknologi berbasis RF, masyarakat daerah urban dikelilingi oleh energi elektromagnetik yang sangat melimpah. Energi ini, jika bisa dimanfaatkan dengan efisien akan mampu menjadi sumber energi alternatif yang menjanjikan. Walaupun dibatasi oleh limitasi daya maksimum yang boleh dipancarkan, sumber-sumber sinyal RF tersebut menjanjikan sumber energi yang hampir tak terbatas yang bisa digunakan sebagai sumber daya bagi divais-divais berkebutuhan daya kecil. Perkembangan teknologi *energy harvesting* dan kemajuan di bidang elektronika yang terus mengembangkan divais-divais berkebutuhan daya kecil akan mendorong penelitian dan pengembangan pemanfaatan sinyal RF sebagai sumber energi *wireless* yang bisa diandalkan.

Pemanfaatan energi RF ini dimungkinkan dengan semakin berkembangnya teknologi *energy harvesting*. *Energy Harvesting* atau *Power Scavenging* adalah istilah yang digunakan untuk teknologi yang mampu ‘menangkap’ dan menyimpan energi dari sumber-sumber yang berada di sekitar manusia ( *ambient source* ) [3]. Sampai saat ini, perkembangan *energy harvesting* baru mampu menghasilkan daya yang relatif kecil ( biasanya hanya berkisar pada besaran miliWatt [3] ) tergantung pada jenis teknologi yang digunakan. Teknologi *energy harvesting* akan semakin berkembang seiring dengan semakin maraknya penyempurnaan dan pengembangan berbagai jenis divais yang cenderung semakin hemat daya dan mampu beroperasi dengan kebutuhan daya yang kecil.

Sinyal RF yang menjadi pilihan dalam skripsi ini adalah sinyal RF pada aplikasi GSM dengan frekuensi 900 MHz. Pertimbangannya antara lain karena di daerah urban, pemancar-pemancar sinyal GSM tersebar dengan cakupan area yang sangat luas sehingga sistem *energy harvesting* dapat digunakan dengan tingkat mobilitas yang tinggi dan juga pada *range* frekuensi GSM 900 MHz, sinyal RF dapat ditransmisikan dengan lebih efisien untuk jarak transmisi yang jauh dan mempunyai rugi-rugi propagasi yang lebih kecil [3].

Sistem *energy harvesting* yang akan diuji dalam skripsi ini didisain untuk bisa mengkonversi energi pada sinyal RF menjadi tegangan DC kapan pun dan di mana pun di daerah perkotaan. Oleh karena itu, dibutuhkan sumber sinyal RF yang bisa tersedia hampir dua puluh empat jam dan memiliki lingkupan area yang luas. Dari banyak pilihan yang tersedia, sinyal GSM lah yang paling memenuhi syarat tersebut. Di hampir semua daerah perkotaan di Indonesia, BTS pemancar sinyal GSM dapat ditemukan hampir di semua pelosok kota dan fakta ini akan sangat menunjang mobilitas penggunaan sistem *energy harvesting*.

Sinyal GSM yang digunakan di Indonesia ada yang memanfaatkan frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz. Semua operator seluler GSM yang beroperasi di Indonesia menggunakan frekuensi di kedua *range* tersebut dan alokasi frekuensi untuk setiap operator diatur oleh pemerintah melalui Direktorat Pos dan Telekomunikasi.

Pemilihan frekuensi GSM 900 MHz juga dipengaruhi oleh berbagai penelitian yang telah dipublikasikan oleh berbagai peneliti yang mengembangkan sistem RF *energy harvesting*. Di dalam penelitian yang dipublikasikan dengan judul “*Investigation of RF Signal Energy Harvesting*” oleh Lutfi Albasha, Soudeh Heydari Nasab, Mohammad Asefi dan Nasser Qaddoumi [5], perbandingan pengukuran besar daya yang dipancarkan pada frekuensi 900 MHz dan 1800 MHz di area kampus *American University of Sharjah*, UAE menunjukkan bahwa daya maksimum yang bisa ditangkap pada frekuensi 900 MHz lebih besar dibandingkan dengan daya pada frekuensi 1800 MHz. Walaupun hasil pengukuran tersebut bukanlah hasil pengukuran yang dilakukan di area yang akan digunakan penyusun, tapi hasil penelitian tersebut bisa dijadikan referensi tentang perbandingan besar daya maksimum yang bisa ditangkap pada kedua frekuensi sinyal GSM. Selain itu, hal ini juga sejalan dengan persamaan Frii tentang hubungan rugi-rugi daya jalur (*pathloss* /  $L_p$ ) sinyal elektromagnetik dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) dan jarak *receiver* dengan *transmitter* ( $R$ ). Persamaan Frii untuk *pathloss* pada *free space* diberikan Persamaan 2.1 berikut [6]:

$$L_p = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (2.1)$$

Pada dasarnya, semakin besar frekuensi suatu sinyal elektromagnetik, maka akan semakin besar pula energi yang ditransmisikannya. Namun, jika frekuensi suatu sinyal makin besar, maka akan semakin kecil panjang gelombangnya, begitu juga jika frekuensinya makin kecil, maka akan semakin besar panjang gelombangnya. Untuk jalur propagasi dengan kondisi lingkungan yang berbeda akan ada pengaruh pada persamaan namun dari Persamaan 2.1 tersebut di atas, bisa dilihat bahwa pada jarak  $R$  yang sama, untuk frekuensi yang makin besar maka besar, *pathloss*-nya pun juga akan lebih besar dibanding dengan frekuensi yang kecil, sehingga daya maksimum yang bisa ditangkap pun akan semakin berkurang. Dengan demikian sinyal GSM 900 MHz merupakan pilihan frekuensi sumber sinyal RF yang lebih baik dibandingkan frekuensi GSM 1800MHz karena memiliki rugi-rugi propagasi yang lebih kecil.

Hubungan panjang gelombang ( $\lambda$ ), kecepatan cahaya di ruang bebas,  $v$  ( $3 \cdot 10^8$  m/s) dan frekuensi gelombang elektromagnetik diberikan oleh Persamaan 2.2 [11].

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.2)$$

Adapun persamaan transmisi *Friis* dapat digunakan untuk mencari besar daya sinyal RF yang bisa diterima oleh sebuah antena [27]. Persamaan ini menghubungkan daya yang bisa diterima sebuah antena dengan *gain* antena, panjang gelombang sinyal dan jarak antar antena. Persamaan transmisi *Friis* diberikan Persamaan 2.3.

$$P_r = P_t G_t G_r (\lambda / 4\pi R)^2 \quad (2.3)$$

Dimana  $P_r$  = Nilai daya yang diterima

$P_t$  = Nilai daya yang dipancarkan

$G_t$  = Penguatan antena transmisi

$G_r$  = Penguatan antena penerima

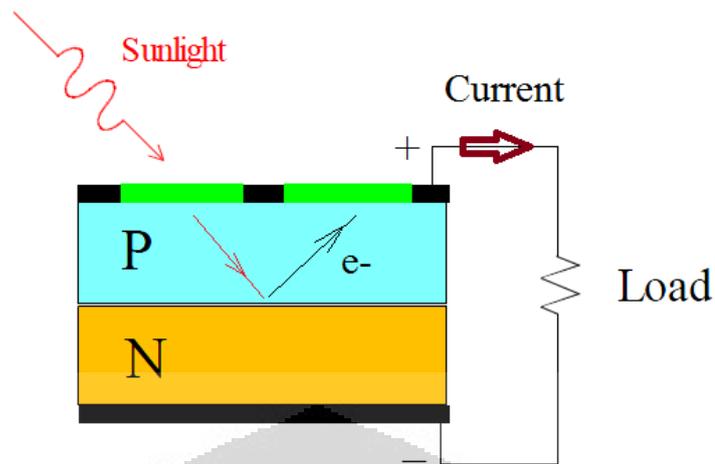
$R$  = Jarak antara antena penerima dan pemancar

## 2.2. SEL SURYA

Sel surya merupakan perangkat berbasis semikonduktor yang mampu mengubah cahaya matahari langsung menjadi energi listrik. Proses pengonversian cahaya matahari langsung menjadi energi listrik dikenal juga dengan proses *photovoltaic*. Energi photon dari cahaya matahari yang jatuh pada permukaan semikonduktor sel surya akan membuat elektron terlepas dari ikatan valensinya di bahan semikonduktor jika besar energi photon lebih besar daripada nilai lebar *band gap* bahan semikonduktor sel surya. Dengan memanfaatkan prinsip P-N *Junction*, elektron-elektron tersebut akan dikumpulkan dan menghasilkan arus listrik dan dengan adanya *photovoltaic effect* akan menimbulkan beda potensial di sel surya.

### 2.2.1. PRINSIP KERJA SEL SURYA

Proses terbentuknya arus akibat adanya cahaya atau biasa disebut dengan *photocurrent* dimulai dengan masuknya foton kedalam struktur semikonduktor, foton ini kemudian akan menyebabkan munculnya pasangan elektron dan *hole*, pasangan elektron dan *hole* inilah yang akan menjadi arus listrik. Namun, elektron dan *hole* ini hanya akan muncul dalam waktu yang relatif singkat sebelum terjadi rekombinasi, yaitu bersatunya kembali pasangan elektron dan *hole*, jika terjadi rekombinasi, maka elektron dan *hole* akan hilang sebelum sempat bergerak menjadi arus listrik, maka pada sel surya terdapat *PN-Junction* untuk mencegah terjadinya rekombinasi elektron-*hole*. Pada *PN-Junction* terdapat medan listrik yang akan menarik elektron dan *hole* dan mencegah terjadinya rekombinasi, sehingga elektron dan *hole* tersebut dapat bergerak ke luar sistem sel surya dan membentuk arus listrik. Jadi proses terbentuknya *photocurrent* dapat kita bagi menjadi dua langkah, yang pertama, yaitu kejadian saat foton menabrak material dan menghasilkan pasangan elektron-*hole* dan yang kedua, yaitu saat elektron dan *hole* terpisah oleh medan yang dihasilkan oleh *PN-Junction* dan mengalir keluar membentuk arus listrik, proses tersebut dapat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Proses Pada Panel Surya [7]

Besarnya *photocurrent* yang muncul pada sel surya besarnya tergantung terhadap cahaya yang mengenai sel surya. Hubungan antara *photocurrent density* ( $\text{Am}^2$ ) dengan cahaya dapat dilihat pada Persamaan 2.4 [8].

$$J_L = q \int b_s(E) QE(E) dE \quad (2.4)$$

$q$  adalah muatan dari elektron dimana  $q = 1,60217646 \times 10^{-19} \text{C}$ .  $QE(E)$  adalah *Quantum Efficiency*, yaitu parameter yang menjelaskan banyaknya elektron yang dihasilkan oleh sel surya untuk setiap foton yang masuk,  $QE$  tidak memiliki besaran dan biasa digambarkan dalam persen(%).  $b_s(E)$  adalah *Spectral Photon Flux*, yaitu besarnya flux foton yang diterima sel surya untuk tiap panjang gelombang dari cahaya matahari. *Spectral Photon Flux* berhubungan dengan besarnya *irradiance* dari cahaya matahari digambarkan pada Persamaan 2.5 [8].

$$b_s(E) = 10^{16} \frac{I_\lambda \cdot \lambda}{19.8} \quad (2.5)$$

Satuan dari *Spectral Photon Flux* adalah  $\text{photon cm}^{-2} \text{um}^{-1} \text{s}^{-1}$ , dengan  $I_\lambda$  adalah *irradiance* dari cahaya matahari dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang (m). Besaran  $E$  pada Persamaan 2.5 menyatakan energi,  $E$

dapat dinyatakan sebagai panjang gelombang seperti pada Persamaan 2.6 [8].

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.6)$$

dengan  $h$  adalah *planck constant* dan  $c$  adalah kecepatan cahaya.

Arus yang muncul dari sel surya tidak hanya berasal dari arus *photocurrent*, terdapat juga arus yang muncul berupa arus saturasi dioda yang muncul dari *PN-Junction*, arus ini arahnya berlawanan dengan arus *photocurrent*, arus ini biasa disebut sebagai *dark current*. Seperti telah disebutkan, sel surya strukturnya berupa dioda, ketika dalam gelap atau ketika tidak menerima cahaya hanya *dark current*  $J_{dark}$  (V) ( $\text{Am}^2$ ) yang dihasilkan, nilai rapat arus ini dipengaruhi oleh tegangan dan juga temperatur, hubungan keduanya dapat dilihat pada Persamaan 2.7 [8].

$$J_{dark}(V) = J_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.7)$$

$V$  merupakan tegangan,  $k_B$  adalah konstanta Boltzman ( $k_B=1.38 \times 10^{-23}$ ), dan  $T$  merupakan temperatur dalam satuan Kelvin,  $J_0$  merupakan arus saturasi (A) dari dioda *PN-Junction* pada sel surya yang nilainya konstan.

Kedua rapat arus ini *photocurrent* dan *dark current* membentuk arus yang dihasilkan oleh sel surya, rapat arus total ( $J$ ) yang dihasilkan adalah superposisi dari kedua jenis rapat arus tersebut dan diberikan oleh Persamaan 2.8 [8].

$$J = J_L - J_{dark} \quad (2.8)$$

sehingga total arus dari sel surya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.9) [8].

$$J = J_L - J_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.9)$$

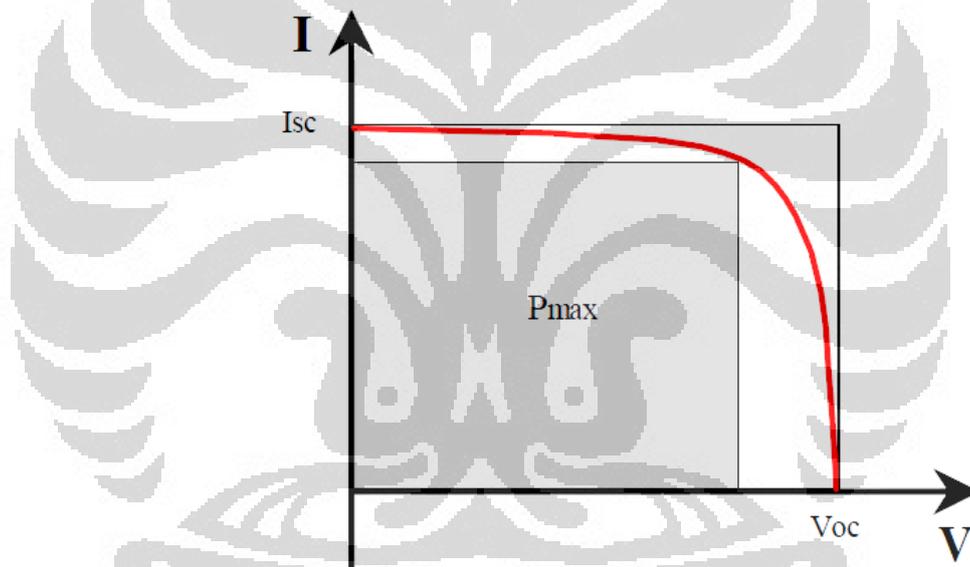
Persamaan 2.7 dinyatakan dalam rapat arus ( $J$ ), persamaan dalam bentuk arus ( $I$ ) adalah seperti pada Persamaan 2.10 [8]

$$I = I_L - I_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.10)$$

## 2.2.2. PARAMETER SEL SURYA

### 2.2.2.1. Kurva Karakteristik I-V Sel Surya

Kurva karakteristik I-V (Gambar 2.3) pada dasarnya merupakan kurva karakteristik arus-tegangan yang menggambarkan unjuk kerja suatu divais sel surya [10].



Gambar2.3 Kurva karakteristik I-V pada sel surya [7]

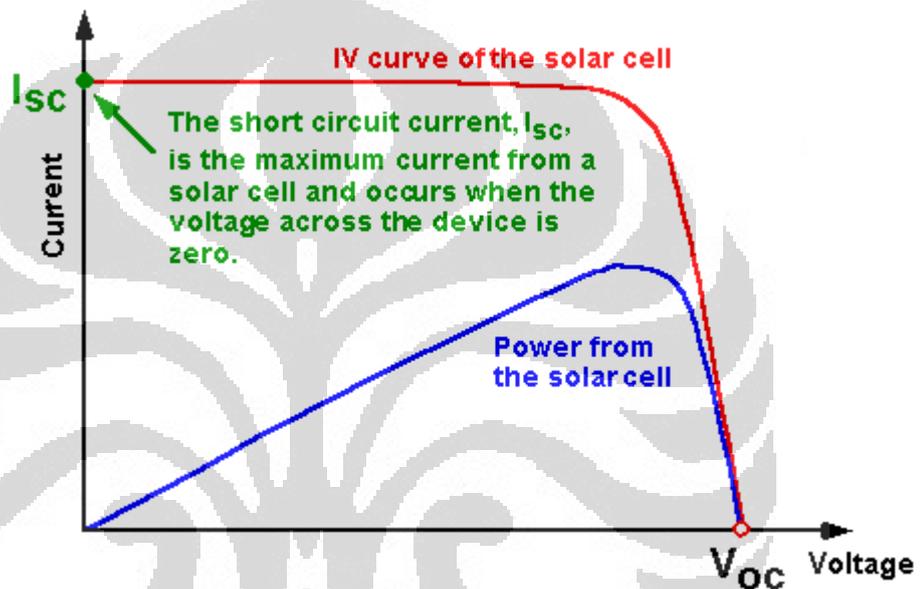
Kurva I-V sel surya merupakan superposisi kurva I-V dioda dari sel surya pada keadaan gelap dengan arus yang dibangkitkan oleh cahaya (*light generated current*). Kurva karakteristik sel surya bisa didapatkan dengan Persamaan 2.11 [9].

$$I = I_o \left( \exp\left(\frac{qV}{n k T}\right) - 1 \right) - I_L \quad (2.11)$$

dimana  $I_L$  merupakan *light-generated current*,  $I_o$  merupakan *dark current*.

### 2.2.2.2. Short-Circuit Current ( $I_{sc}$ )

*Short-circuit current* atau arus hubung singkat merupakan arus yang muncul pada saat sel surya berada dalam keadaan *short circuit* atau saat tidak ada tegangan yang melalui sel surya. Arus *short-circuit* disebabkan oleh proses pengumpulan elektron yang dihasilkan oleh cahaya matahari. Kurva I-V yang menunjukkan arus *short-circuit* ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kurva I-V menunjukkan arus *short-circuit* [9]

Besarnya arus *short-circuit* berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari yang menyinari permukaan sel surya dan sangat dipengaruhi oleh jumlah foton yang datang, luas permukaan sel surya yang terkena cahaya, spektrum gelombang cahaya yang diterima, karakteristik optik bahan semikonduktor dan besarnya probabilitas pengumpulan elektron dari bahan semikonduktor yang digunakan.

### 2.2.2.3. Open-Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )

*Open-circuit voltage* atau tegangan hubung buka merupakan tegangan yang terdapat pada sel surya saat open-circuit atau saat tidak ada arus yang mengalir pada sel surya. Nilai  $V_{oc}$  dapat dicari dengan memasukkan nilai 0 untuk parameter  $I$  pada persamaan arus sel surya,

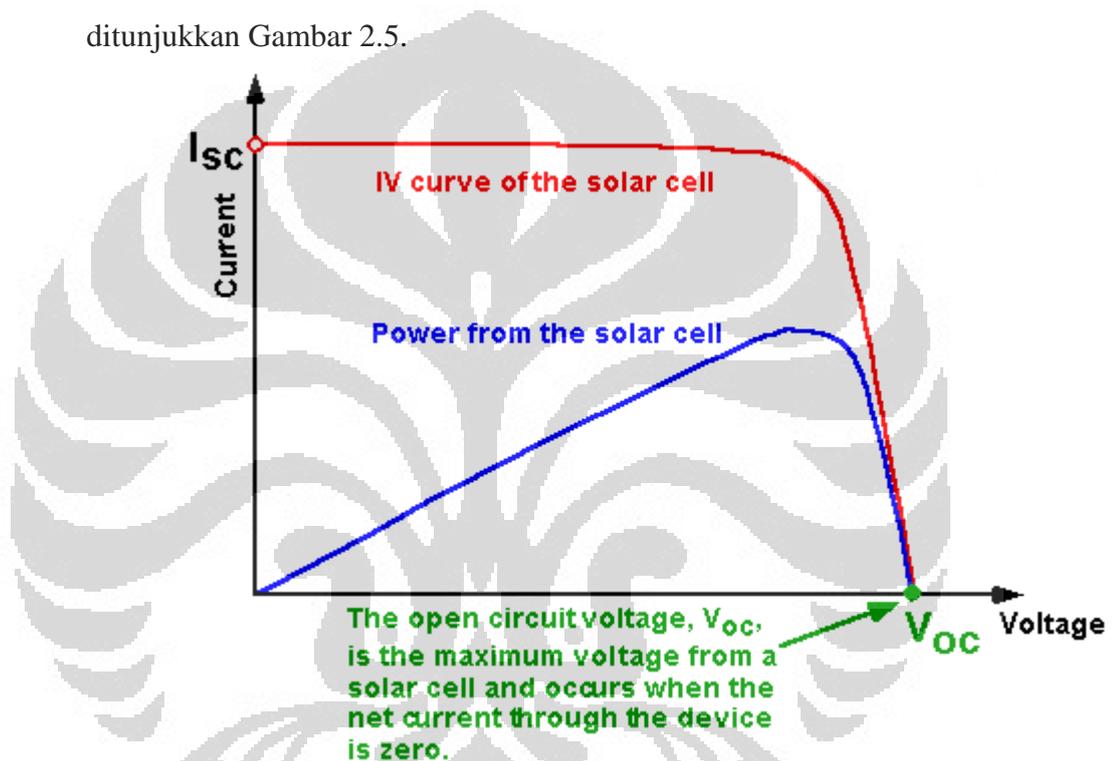
seperti pada Persamaan 2.12 [9], sehingga,

$$0 = I_L - I_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.12)$$

maka  $V_{oc}$  adalah,

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.13)$$

Kurva I-V yang menunjukkan besarnya tegangan *open-circuit* ditunjukkan Gambar 2.5.



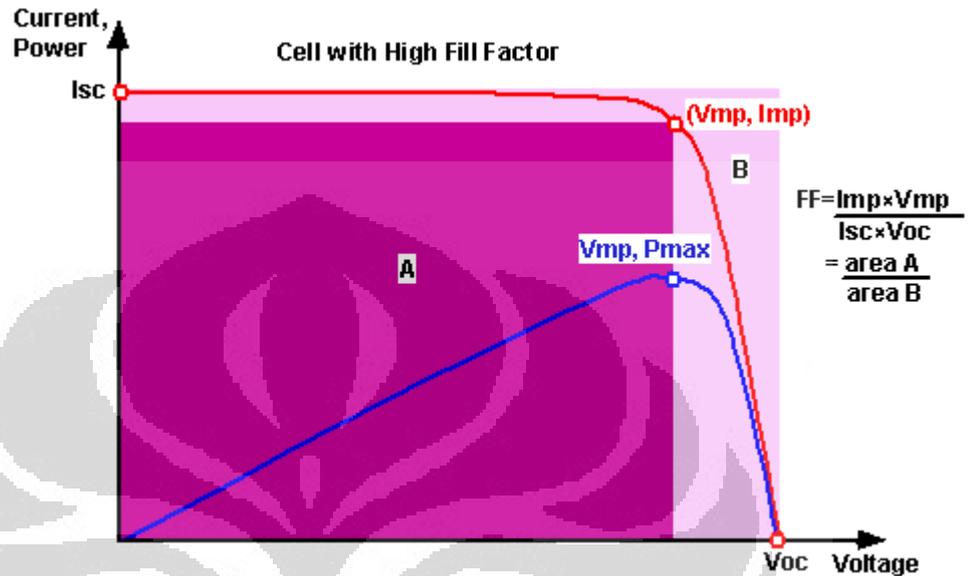
Gambar 2.5 Kurva I-V menunjukkan dan tegangan *open-circuit* [9]

Nilai  $V_{oc}$  ini bergantung pada nilai arus saturasi yang dihasilkan sel surya ( $I_0$ ). Nilai  $V_{oc}$  ini juga dapat dianggap sebagai seberapa besar jumlah rekombinasi *electron-hole* yang terjadi pada sel surya. Selain arus saturasi, nilai  $V_{oc}$  juga bergantung pada temperatur atau suhu sel surya.

#### 2.2.2.4. Fill Factor (FF)

*Fill factor* (FF) merupakan parameter yang berfungsi untuk menentukan daya maksimum dari sel surya dalam kaitannya dengan  $V_{oc}$  dan  $I_{sc}$ . FF menentukan besarnya daya maksimum yang dapat dihasilkan

oleh suatu divais, sehingga akan menentukan besarnya arus dan tegangan maksimum *power point*. Pada Gambar 2.6 terlihat bahwa perbandingan daerah yang dibentuk oleh  $V_{mp} \times I_{mp}$  dengan daerah yang dibentuk oleh  $V_{oc}$  dan  $I_{sc}$  menghasilkan nilai FF. Nilai FF ideal adalah yang mendekati 1.



Gambar 2.6 Titik daya, tegangan, dan arus maksimum pada kurva I-V sel surya untuk menunjukkan *fill factor* [9]

Untuk menghitung nilai dari *fill factor* digunakan Persamaan 2.14 dan Persamaan 2.15 [9]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.14)$$

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc}} \quad (2.15)$$

Dengan  $v_{oc}$  adalah normalisasi dari  $V_{oc}$  yang dinyatakan dengan Persamaan 2.16.

$$v_{oc} = \frac{q}{n k T} V_{oc} \quad (2.16)$$

#### 2.2.2.5. Efisiensi ( $\eta$ )

Efisiensi merupakan perbandingan antara daya yang masuk dari cahaya matahari dengan daya yang berhasil dikonversi oleh sel surya menjadi daya listrik. Efisiensi dapat dinyatakan dengan menggunakan Persamaan 2.17 [9].

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2.17)$$

## 2.3. ANTENA

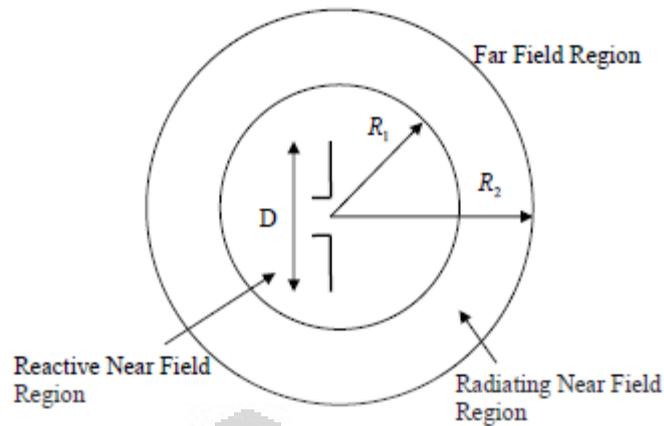
### 2.3.1. DEFINISI ANTENA

Antena merupakan struktur metal yang didisain untuk meradiasikan dan menerima energi elektromagnetik. Sebuah antena bertindak sebagai penghubung antara divais pembimbing (*guiding device: waveguide, transmission line*) dengan udara bebas. Definisi resmi antena dari IEEE mengikuti pernyataan Stutzman and Thiele [11] dimana antena dijelaskan sebagai, “Bagian dari sistem transmisi atau penerima yang didisain untuk meradiasikan atau menerima gelombang elektromagnetik”.

Radiasi antena terjadi ketika terdapat nilai arus yang bervariasi terhadap waktu ataupun terdapat percepatan ( atau perlambatan) muatan-muatan pada kawat konduktor. Jika tidak terdapat gerakan muatan-muatan pada kawat maka tidak akan ada radiasi yang terjadi karena tidak adanya aliran arus. Radiasi juga tidak akan terjadi, jika muatan-muatan bergerak dengan kecepatan yang uniform di sepanjang kawat lurus. Namun, muatan-muatan yang bergerak dengan kecepatan uniform di sepanjang kawat yang melingkar atau kawat bengkok akan bisa menghasilkan radiasi. Radiasi pada kawat lurus juga akan terjadi jika ada muatan yang berosilasi dengan waktu, seperti yang dijelaskan oleh Balanis [11].

### 2.3.2. AREA MEDAN JAUH DAN MEDAN DEKAT

Pola medan radiasi (*field*) antena berubah-ubah terhadap jarak dan terkait dengan dua jenis energi, yaitu energi radiasi dan energi reaktif. Area di sekitar antena bisa dibagi menjadi tiga bagian seperti yang terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Area radiasi di sekitar antenna [12]

Ketiga area yang terdapat pada Gambar 2.7 di atas, yaitu:

- *Reactive near-field region*: Pada area ini medan reaktif mendominasi. Energi reaktif bersilasi mendekati dan menjauhi antenna, sehingga terlihat sebagai reaktansi. Pada area ini, energi hanya akan disimpan dan tidak ada energi yang didisipasi. Batas paling luar dari area ini terdapat pada jarak  $R_1$  yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.18 [12].

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.18)$$

dimana  $R_1$  merupakan jarak dari permukaan antenna,  $D$  merupakan dimensi terbesar dari antenna dan  $\lambda$  merupakan panjang gelombang.

- *Radiating near-field region (Fresnel region)* : Area ini terdapat pada area diantara *reactive near-field region* dan *far field region*. Medan reaktif yang ada di medan ini lebih kecil jika dibandingkan pada *reactive near-field region* dan medan radiasi lah yang lebih mendominasi. Pada area ini, distribusi medan angular merupakan fungsi dari jarak terhadap antenna. Batas luar area ini ( $R_2$ ) dapat dihitung dengan Persamaan (2.19) [12].

$$R_2 = 2D^2\lambda \quad (2.19)$$

- *Far-field region (Fraunhofer region)*: Merupakan area yang terdapat di

sebelah luar batas  $R_2$  dan bisa dihitung dengan Persamaan 2.18. Pada area ini, medan reaktif sudah tidak ada dan hanya medan radiasi yang ada. Distribusi angular medan ini tidak tergantung pada jarak terhadap antenna dan kerapatan daya berubah-ubah sebanding dengan invers kuadrat jarak radial pada area ini.

### 2.3.3. PARAMETER UNJUK KERJA ANTENA

Parameter-parameter yang digunakan untuk mengukur performa antenna antara lain, pola radiasi (*radiation pattern*), direktivitas (*directivity*), impedansi input (*input impedance*), *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), *Return Loss* (RL), efisiensi antenna, penguatan antenna (*antenna gain*), polarisasi dan *bandwidth*.

- Pola Radiasi

Pola radiasi antenna secara spesifik adalah plot daya yang diradiasikan antenna per unit sudut yang merupakan representasi intensitas radiasi [11].

- Direktivitas

Berdasarkan definisi yang diberikan Balanis dalam bukunya *Antenna Theory Analysis and Design* terbitan John Wiley and Son di tahun 1997 [11], direktivitas antenna adalah rasio intensitas radiasi pada suatu arah tertentu terhadap intensitas rata-rata semua arah radiasi.

- Impedansi Input

Impedansi input berdasarkan buku *Antenna Theory Analysis and Design* karya Balanis terbitan John Wiley and Son di tahun 1997 [11] merupakan nilai impedansi pada terminal antenna.

- VSWR

VSWR pada dasarnya merupakan parameter yang mengukur perbedaan (*mismatch*) besar impedansi antara transmiter dan antenna. Transfer daya yang maksimum hanya bisa dicapai, jika besar impedansi antenna ( $Z_{in}$ ) sebanding (*match*) dengan impedansi pada *receiver* ( $Z_s$ ). Berdasarkan teorema transfer daya, daya maksimum bisa ditransfer, jika impedansi transmiter atau *receiver* merupakan konjugasi kompleks dari besar impedansi antenna yang digunakan dan begitu juga sebaliknya [12]. Dengan kata lain harus memenuhi Persamaan 2.20 [12]:

$$Z_{in} = Z_s \quad (2.20)$$

dimana  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$

$$Z_s = R_s + jX_s$$

Jika kondisi *matching* tidak tercapai, maka akan ada daya yang dipantulkan kembali dan ini akan menimbulkan gelombang berdiri (*standing wave*), yang bisa diwakili oleh parameter *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR). Nilai VSWR ini diberikan oleh Makarov dalam Persamaan 2.21 [13]:

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.21)$$

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_{in}-Z_s}{Z_{in}+Z_s} \quad (2.22)$$

Dengan  $\Gamma$  merupakan koefisien refleksi.  $V_r$  merupakan amplitudo dari gelombang yang dipantulkan dan  $V_i$  merupakan amplitudo dari gelombang datang. VSWR pada dasarnya mengukur perbedaan impedansi antena dan jalur transmisi. Semakin besar nilai VSWR semakin besar pula perbedaan nilai impedansi. Nilai VSWR=1 merupakan nilai minimum yang mewakili keadaan *matching* sempurna. Antena yang dijual di pasaran pada umumnya, telah memiliki nilai VSWR tertentu, yang berarti kondisi *matching* telah diperhitungkan dalam pembuatan antena, sehingga pengguna tidak perlu menggunakan lagi *impedance matching*. Pemilihan antena yang digunakan pada sistem dapat melihat nilai parameter VSWR yang paling baik, sehingga kemungkinan rugi-rugi akibat *mismatch* dapat diminimalisir.

- *Return Loss*

*Return Loss* merupakan parameter yang mengindikasikan jumlah daya yang hilang akibat pemberian beban dan tidak memantul kembali di saluran transmisi. VSWR dan RL bersama-sama menjadi parameter yang menentukan kondisi *matching* pada antena dan saluran transmisi.

- Efisiensi Antena

Efisiensi antena merupakan parameter yang menentukan seberapa banyak rugi-rugi daya yang muncul pada terminal dan struktur antena.

- *Gain*

Penguatan antena seperti yang dijelaskan oleh Ulaby dalam bukunya *Fundamentals of Applied Electromagnetics* terbitan Prentice Hall di tahun 1999 [14] merupakan jumlah daya yang bisa dicapai pada satu arah dengan menghasilkan rugi-rugi daya pada arah radiasi lainnya.

- *Polarisasi*

Menurut definisi yang diberikan Balanis dalam bukunya *Antenna Theory Analysis and Design* terbitan John Wiley and Son di tahun 1997 [11], polarisasi merupakan properti gelombang elektromagnetik yang menjelaskan variasi arah terhadap waktu dan besar relatif dari vektor medan listrik.

- *Bandwidth*

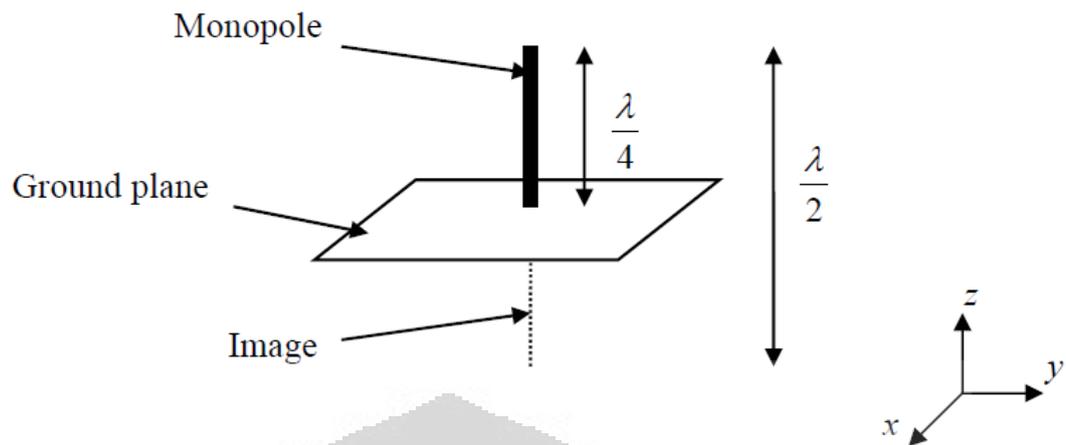
*Bandwidth* antena didefinisikan oleh Balanis dalam bukunya *Antenna Theory Analysis and Design* terbitan John Wiley and Son di tahun 1997 [11] sebagai *range* frekuensi yang bisa digunakan dalam penggunaan antena tergantung karakteristik yang sesuai dengan standar tertentu.

Parameter-parameter antena tersebut akan berbeda-beda tergantung jenis dan bentuk antena. Seringkali parameter-parameter tersebut direkayasa agar didapatkan antena dengan fungsi spesifik yang dibutuhkan perancang. Bentuk antena sendiri bermacam-macam sesuai dengan desain, pola penyebaran dan frekuensi dan *gain* yang dibutuhkan [13]. Bentuk dan ukuran antena akan menentukan besar energi yang bisa dipancarkan atau ditangkap dan arah radiasi gelombang elektromagnetik.

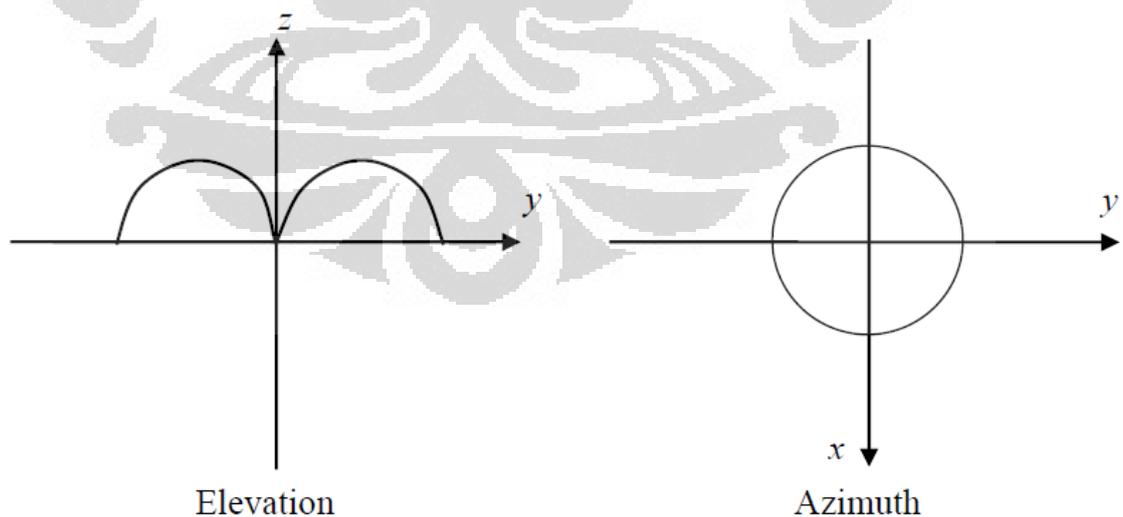
## 2.3.4. JENIS ANTENA

### 2.3.4.1. Antena Monopole

Antena monopole terbentuk dari penggabungan bidang konduktor yang dipasang dibawah elemen tunggal pembawa arus dengan panjang tertentu dimana radiasi elektromagnetik hanya terjadi di bagian atas bidang konduktor [15]. Antena monopole ditunjukkan oleh Gambar 2.8.

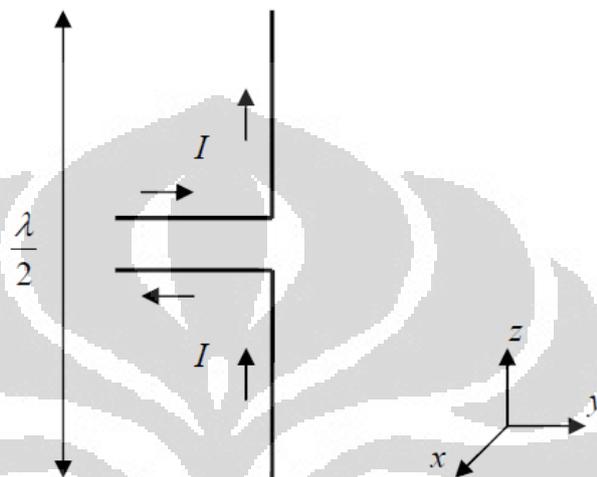
Gambar 2.8 Antena *monopole* [11]

Panjang antena monopole merupakan seperempat dari panjang gelombang ( $\lambda$ ) yang digunakan, karena itu antena *monopole* sering juga disebut antena monopole seperempat panjang gelombang (*quarter wavelength monopole*). Besar penguatan (*gain*) untuk kebanyakan antena monopole adalah 2 - 6 dB dan mempunyai lebar *bandwidth* sekitar 10%. Hambatan radiasinya sekitar 36,5 Ohm dan mempunyai nilai *directivity* sebesar 3,28 (5,16 dB) [11]. Pola radiasi antena monopole ditunjukkan Gambar 2.9.

Gambar 2.9 Pola radiasi antena *monopole* [11]

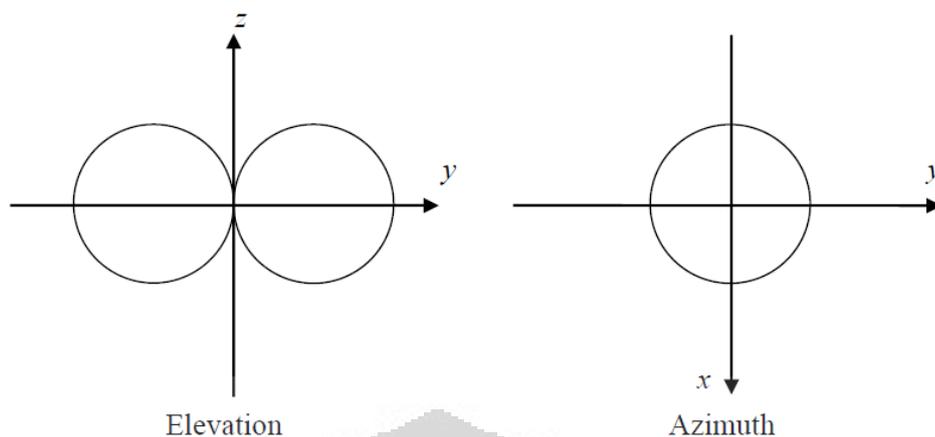
### 2.3.4.2. Antena Dipole

Antena dipole setengah gelombang (*Half-wave dipole*) (Gambar 2.10) mempunyai panjang yang besarnya sama dengan besar setengah panjang gelombang kerjanya. Meskipun besar panjangnya bisa lebih kecil atau lebih besar dari nilai setengah panjang gelombang, akan ada *trade-off* terhadap parameter unjuk kerjanya.



Gambar 2.10 Antena dipole setengah gelombang [11]

Antena dipole terdiri dari dua buah jalur transmisi, dimana arus pada kedua batang konduktor terdistribusi secara sinusoidal, mempunyai besar yang sama namun berbeda arah. Tidak ada radiasi yang muncul dari jalur transmisi akibat munculnya efek *cancelling*. Pada Gambar 2.10 ditunjukkan bahwa arus pada lengan antena dipole mempunyai arah yang sama dan menghasilkan radiasi di arah horizontal. Dengan demikian, untuk arah vertikal, antena dipole meradiasikan sinyal di arah horizontal. Besarnya gain pada antena dipole umumnya sekitar 2 dB dan mempunyai lebar *bandwidth* sekitar 10% dengan direktivitas 1,64 (2,15 dB). Gambar 2.11 menunjukkan pola radiasi untuk antena dipole setengah gelombang.



Gambar 2.11 Pola radiasi antenna dipole setengah gelombang [11]

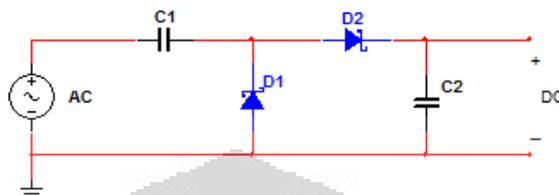
## 2.4. CHARGE PUMP

Sinyal elektromagnetik GSM frekuensi 900 MHz merupakan sinyal AC ( *Alternating Current* ) dan karena dalam skripsi ini akan digunakan untuk men-charge baterai, maka sinyal AC yang ditangkap antenna perlu disearahkan menjadi sinyal DC ( *Direct Current* ). Pemilihan rangkaian penyearah ( *rectifier* ) dalam sistem *RF energy harvesting* ini harus mempertimbangkan fakta bahwa sistem akan bekerja pada level daya yang rendah, sehingga perlu digunakan rangkaian penyearah yang sederhana, bisa digunakan dan efisien saat bekerja pada level daya yang kecil. Ada beberapa pilihan rangkaian sederhana yang bisa digunakan pada sistem ini seperti rangkaian *half wave peak rectifier* dan *full-wave rectifier*, namun pada skripsi ini digunakan rangkaian *charge pump*.

*Charge pump* adalah rangkaian elektronik yang ketika diberikan masukan sinyal AC akan memberikan keluaran tegangan DC yang lebih besar dibanding sinyal masukannya. Rangkaian *charge pump* dapat juga dikatakan sebagai konverter AC ke DC ( *rectifier* ) yang sekaligus memperbesar nilai tegangan DC-nya ( *amplifier* ). Rangkaian *charge pump* merupakan fondasi dari rangkaian konverter daya yang banyak digunakan dalam berbagai divais elektronik sekarang ini. Rangkaian *charge pump* tersebut lebih kompleks, namun untuk skripsi ini digunakan jenis *charge pump* yang lebih sederhana dan dikenal dengan rangkaian *voltage doubler* dengan *n-stages*.

Skema rangkaian *voltage doubler* dengan satu *stage* ditunjukkan oleh

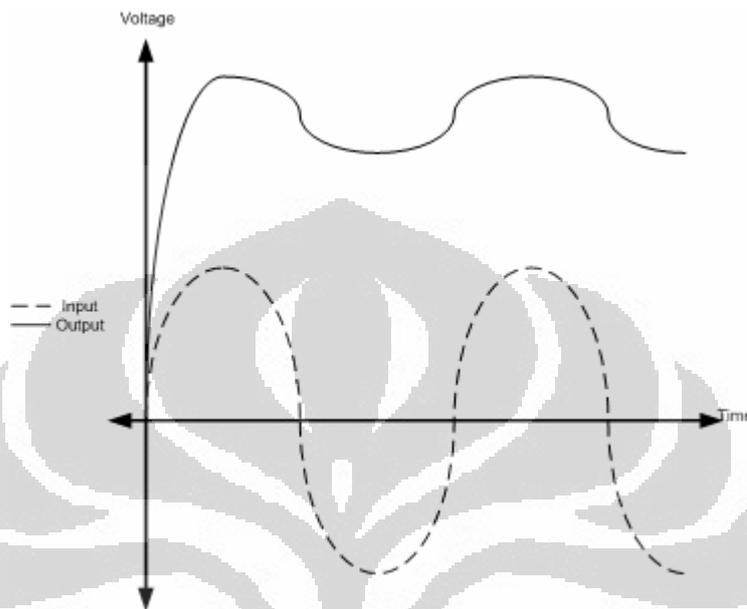
Gambar 2.12. Rangkaian *voltage doubler* sesuai namanya merupakan rangkaian yang menghasilkan tegangan keluaran yang dua kali lebih besar dibanding tegangan puncak *input* dikurangi dua kali tegangan *threshold* dioda pada rangkaian.



Gambar 2.12 Skema rangkaian *voltage doubler 1 stage* [2]

Cara kerja rangkaian *voltage doubler* dapat dilihat pertama kali dari aliran arus pada rangkaian. Saat gelombang AC memulai setengah siklus positif pertama, maka akan ada gelombang *input* sinusoidal,  $V_{in} = A \sin(\omega t)$ . Jika besar nilai puncak gelombang *input* mencapai nilai yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan *threshold* kedua dioda ( $V_{th}$ ), kapasitor C1 akan mulai menyimpan muatan dan terus menyimpan muatan sampai nilai tegangan puncak A tercapai. Jika hal tersebut terjadi, maka  $V_{C1} = A - V_{th}$ . Saat siklus gelombang sinusoidal *input* menurun, kapasitor C1 akan tetap menahan tegangan dengan nilai yang sama karena tidak adanya jalur pembuangan muatan. Pada kondisi ini dioda akan bertindak sebagai rangkaian terbuka. Saat tegangan *input* memasuki setengah siklus negatifnya, hanya D2 yang akan mengalirkan arus dari sumber. Hal ini akan menyebabkan kapasitor C2 terisi dengan besar tegangan yang sama dengan nilai tegangan *input* ditambah besar tegangan yang telah tersimpan di kapasitor C1 [16]. Dengan demikian, tegangan yang tersimpan pada kapasitor C2 secara kasar akan bernilai dua kali lebih besar dibandingkan dengan nilai tegangan puncak sinyal RF dikurangi tegangan *threshold* dioda. Hal yang menarik dari rangkaian ini adalah bahwa dengan menyambungkan antar *stage* rangkaian *voltage doubler* secara seri, maka akan didapatkan penambahan besaran tegangan pada *output* rangkaian. Hal ini dimungkinkan karena keluaran dari rangkaian ini bukanlah tegangan DC murni. Keluaran rangkaian *voltage doubler* pada dasarnya adalah sinyal AC dengan *offset* DC atau bisa dikatakan bahwa keluarannya

merupakan sinyal DC yang mengandung *noise*. Hal ini bisa lebih terlihat pada grafik yang ditunjukkan Gambar 2.13. Gambar 2.13 menunjukkan perbandingan antara sinyal *input* dan *output* pada rangkaian *voltage doubler* yang disambungkan secara seri dengan rangkaian *voltage doubler* lainnya.



Gambar 2.13. Bentuk gelombang rangkaian *voltage doubler* [2]

Jika *stage* kedua rangkaian *voltage doubler* ditambahkan setelah *stage* yang pertama, maka gelombang yang dilihat *stage* kedua hanyalah *noise* dari *stage* pertama. *Noise* ini kemudian digandakan pada rangkaian *stage* kedua dan ditambahkan pada tegangan DC hasil *stage* pertama. Oleh karena itu, secara teoritis jika jumlah *stage* pada rangkaian *voltage doubler* ditambahkan, maka akan semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

Besar tegangan *output* susunan n-buah *voltage doubler* diberikan oleh Hart dkk yang dipublikasikan dalam [16]. Tegangan *output* pada susunan n-buah *voltage doubler* diberikan Persamaan 2.23.

$$V_n = n V_{in} \quad (2.23)$$

dimana  $V_{in}$  merupakan tegangan *input* rangkaian dan n merupakan jumlah *stage* yang digunakan. Persamaan 2.21 digunakan dengan asumsi dioda ideal dan

tidak mempertimbangkan besar tegangan *threshold* dioda ( $V_{th}$ ) dan rugi-rugi lainnya.

Saat rangkaian *voltage multiplier* (*n-stages voltage doubler*) dihubungkan dengan beban, beban akan menarik muatan yang telah disimpan dalam kapasitor. Muatan yang ditarik beban dari kapasitor memenuhi Persamaan 2.24 [16].

$$\Delta q = \frac{I_{load}}{f} \quad (2.24)$$

Penambahan beban akan mempengaruhi besar tegangan output, lalu jika besar tegangan *turn-on* (*threshold*) dioda diperhitungkan untuk mencari besar tegangan *output* saat disambungkan dengan beban dapat digunakan Persamaan 2.25 [16].

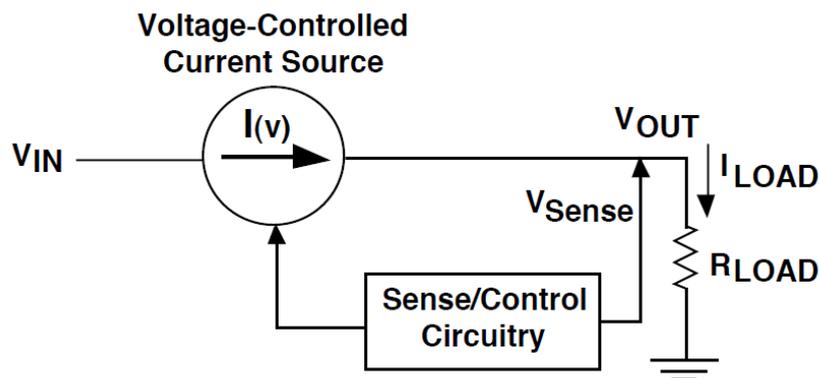
$$V_n = n V_{in} - V_{th} - \frac{n-1}{f C} I_{load} \quad (2.25)$$

## 2.5. VOLTAGE REGULATOR

Setiap rangkaian elektronik umumnya didisain untuk bekerja dengan suatu sumber tegangan yang biasanya diasumsikan mempunyai nilai konstan. Untuk itu, diperlukan sebuah *voltage regulator* untuk menjaga besar tegangan tetap konstan secara terus menerus walaupun terjadi perubahan nilai pada arus beban ataupun pada besar tegangan *input*.

### 2.5.1. LINEAR VOLTAGE REGULATOR

Sebuah regulator linear pada prinsipnya bekerja berdasarkan pada sebuah sumber arus yang dikontrol tegangan (*voltage-controlled current source*) yang menghasilkan besar tegangan yang konstan di terminal *output* regulator. Skema prinsip kerja sebuah regulator linear ditunjukkan oleh Gambar 2.14.

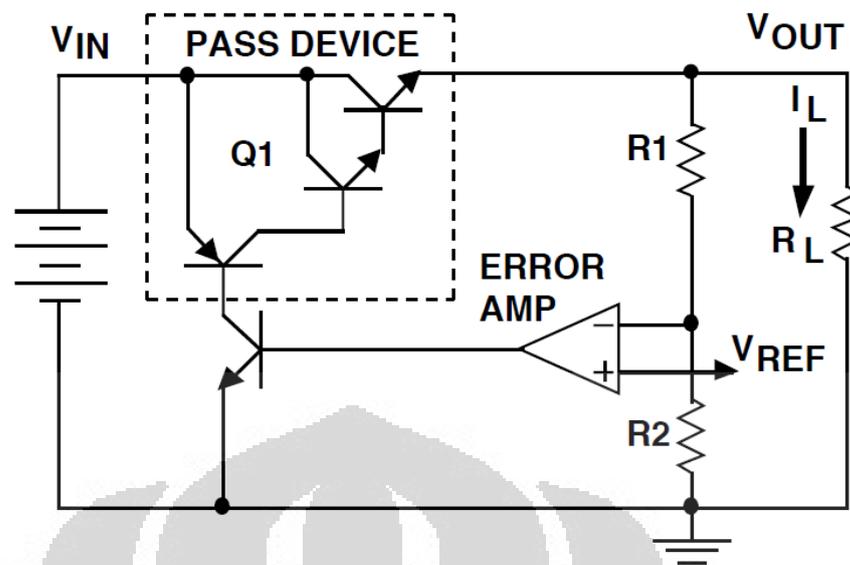


Gambar 2.14 Skema prinsip kerja sebuah regulator linear [17]

Rangkaian kontrol harus memonitor tegangan *output* dan menyesuaikan nilai sumber arus sesuai dengan yang dibutuhkan beban untuk menjaga besar tegangan output pada nilai yang diinginkan. *Current source* didisain supaya regulator bisa menyuplai arus beban maksimum sambil tetap bisa menjaga kekonstanan nilai tegangan. Tegangan *output* dikontrol menggunakan *feedback loop* yang membutuhkan semacam kompensasi untuk menjaga kestabilan *loop*. Kebanyakan regulator linear mempunyai kompensasi tertentu dan bisa tetap menjaga kestabilan walaupun tanpa tambahan komponen eksternal. Meskipun demikian, beberapa jenis regulator seperti *Low-Dropout regulator* tetap membutuhkan tambahan kapasitansi eksternal yang terhubung dari terminal *output* dan *ground* untuk menjaga kestabilannya. Karakteristik lainnya dari sebuah regulator linear, yaitu memerlukan sejumlah waktu untuk menyesuaikan besar tegangan ke nilai yang diinginkan, jika terjadi perubahan nilai arus beban. Waktu yang dibutuhkan ini didefinisikan sebagai *transient response*, dimana parameter ini mengukur seberapa cepat regulator bisa mencapai kondisi *steady-state*, jika terjadi perubahan beban.

#### 2.5.1.1. Prinsip Kerja

Cara kerja sebuah *control loop* pada regulator linear dapat dijelaskan dari skema rangkaian dasar sebuah regulator linear, seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Skema rangkaian dasar sebuah regulator linear [17]

*Pass device* (Q1) pada rangkaian regulator di atas terbuat dari NPN Darlington yang di-*drive* oleh PNP transistor (topology ini merupakan sebuah regulator *Standard*). Arus yang mengalir keluar dari *emitter pass transistor* (yang juga merupakan arus beban  $I_L$ ) dikontrol oleh Q2 dan *voltage error amplifier*. Arus yang melalui resistor voltage divider R1, R2 bisa diabaikan jika dibandingkan nilainya dengan arus beban.

*Feedback loop* yang mengontrol tegangan *output* didapat dari penggunaan R1 dan R2 untuk mendeteksi tegangan *output* dan tegangan yang dideteksi kemudian digunakan pada *input inverting* dari *voltage error amplifier*. *Non-inverting input* terhubung dengan tegangan referensi, sehingga *error amplifier* akan terus menerus menyesuaikan tegangan *output* (dan arus yang melalui Q1) untuk memaksa tegangan *input* bernilai sama.

*Feedback loop* bekerja secara terus menerus menahan tegangan *output* pada nilai tetap yang merupakan perkalian dari tegangan referensi (seperti yang diset oleh R1 dan R2), walaupun terjadi perubahan arus beban. Yang penting diperhatikan adalah bahwa perubahan tiba-tiba nilai arus beban (perubahan pada nilai resistansi beban) akan menyebabkan tegangan *output* akan berubah sampai *loop* bisa mengembalikan nilai tegangan ke nilai yang ditentukan (ini disebut *transient response*).

Perubahan tegangan *output* akan dideteksi oleh R1 dan R2 dan akan terlihat sebagai sinyal eror pada *input error amplifier*, sehingga menyebabkan *error amplifier* akan membenarkan nilai arus melalui Q1.

### 2.5.1.2. Jenis-jenis Regulator Linear

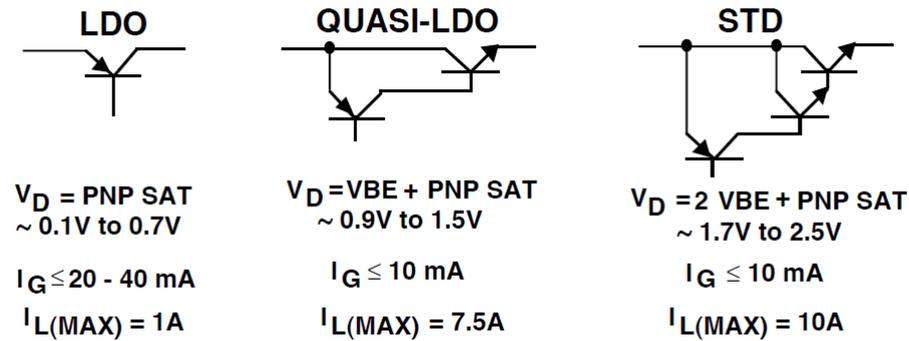
Regulator linear dapat dibedakan lagi menjadi tiga buah jenis regulator, yaitu:

1. *Standard (NPN Darlington) Regulator*
2. *Low Dropout (LDO) Regulator*
3. *Quasi LDO Regulator*

Perbedaan paling mendasar dari ketiga jenis regulator ini adalah *dropout voltage*, yang didefinisikan sebagai tegangan jatuh minimum yang diperlukan pada regulator untuk menjaga regulasi tegangan *output*. Hal penting yang perlu dipertimbangkan adalah regulator linear yang bekerja dengan tegangan paling kecil mendisipasikan daya internal paling sedikit dan mempunyai efisiensi yang paling besar. LDO memerlukan tegangan yang paling sedikit melewatinya sedangkan regulator *Standard* memerlukan tegangan yang paling besar.

Perbedaan kedua antara ketiga jenis regulator linear tersebut adalah *ground pin current* yang diperlukan oleh tiap regulator saat men-*drive* arus beban. *Regulator Standard* mempunyai nilai *ground pin current* yang paling kecil, sementara LDO umumnya mempunyai nilai yang paling besar. Kenaikan nilai *ground pin current* tidak diinginkan, karena merupakan arus yang terbuang, ia harus disuplai oleh sumber tapi tidak memberikan daya ke beban.

Perbedaan karakteristik ketiga jenis regulator linear ini dapat disimpulkan oleh Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perbedaan karakteristik ketiga jenis regulator linear [17]

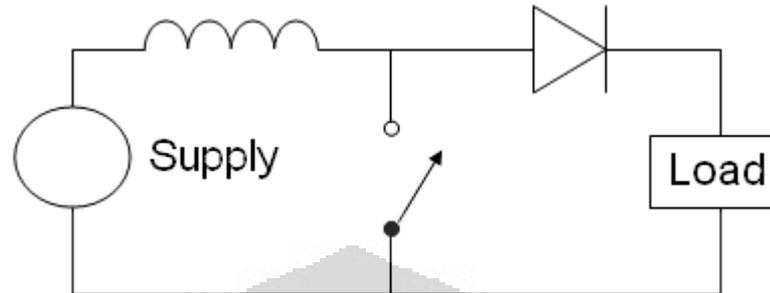
*Regulator Standard* umumnya sangat bagus untuk aplikasi yang bersumber AC, dimana harganya yang murah dan arus beban yang tinggi membuatnya menjadi pilihan ideal. Pada aplikasi yang bersumber AC, tegangan yang melewati regulator biasanya paling tidak lebih besar dari 3V, sehingga *dropout voltage* tidak begitu berpengaruh.

Hal yang menarik adalah, pada aplikasi yang bersumber AC (dimana tegangan jatuh yang melewati regulator > 3 V), *regulator Standard* lebih efisien, jika dibandingkan dengan LDO (karena regulator Standard punya disipasi daya internal paling sedikit akibat pengaruh *ground pin current*). Regulator LDO sangat baik terutama pada aplikasi yang bersumber baterai, karena nilai *dropout voltage* yang kecil berarti sedikit pula sel baterai yang diperlukan untuk meregulasi tegangan *output*. Jika perbedaan nilai tegangan *input-output* kecil (1 – 2 V), maka LDO lebih efisien jika dibandingkan dengan regulator *Standard* karena berkurangnya disipasi daya akibat arus beban yang naik seiring dengan perbedaan nilai *input-output*.

## 2.5.2. BOOST CONVERTER

*Boost converter* atau *step-up converter* merupakan pengonversi daya yang mampu mengubah nilai tegangan DC input menjadi tegangan DC output yang lebih besar. *Boost converter* merupakan jenis dari *Switching-mode Power Supply* (SMPS) yang terdiri atas sedikitnya dua *switch* semikonduktor (dioda atau transistor) dan sedikitnya satu elemen penyimpan energi. Filter yang terbuat dari kapasitor (kadang

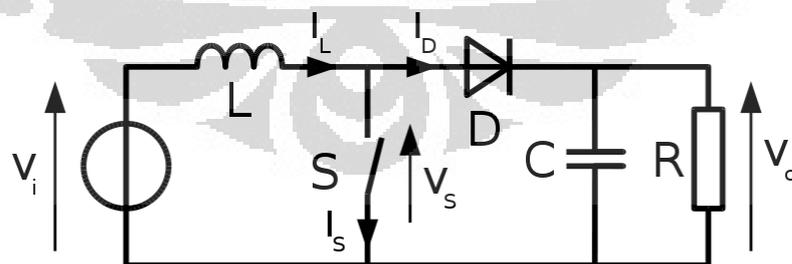
dikombinasikan dengan induktor) biasanya ditambahkan pada bagian *output* untuk mengurangi *ripple* pada tegangan *output*. Skema rangkaian dasar dari sebuah *boost converter* ditunjukkan Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Rangkaian dasar sebuah *boost converter* [18]

Prinsip kerja dasar dari rangkaian *boost converter* adalah kecenderungan dari sebuah induktor untuk bertahan terhadap perubahan nilai arus. Saat terjadi pengisian muatan (*charging*), induktor akan bertindak sebagai beban dan menyerap energi (menyerupai resistor), sedang saat *discharging* induktor akan bertindak sebagai sumber energi (menyerupai baterai). Besar tegangan yang dihasilkan saat fase *discharge* berhubungan dengan tingkat perubahan arus, bukan dengan nilai awal tegangan *charging*, sehingga memungkinkan perbedaan nilai tegangan *input* dan *ouput*.

Rangkaian *boost converter* bekerja berdasarkan dua kondisi kerja bagian *switch*-nya. Perhatikan Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Cara kerja rangkaian *boost converter* [18]

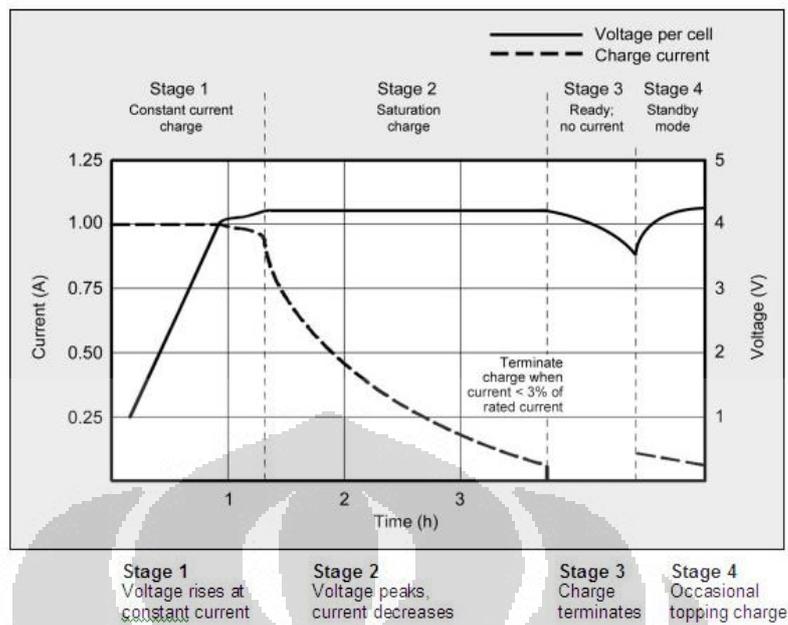
Saat kondisi “On”, *switch* S akan tertutup, sehingga arus hanya akan melewati induktor saja dan terjadi peningkatan besar arus pada induktor. Saat kondisi “Off” terjadi, *switch* S akan terbuka sehingga arus induktor

akan melewati dioda  $D$ , kapasitor  $C$  dan beban  $R$ . Hal ini akan menyebabkan terjadinya perpindahan energi yang terkumpul selama kondisi “*On*” ke kapasitor. Besar arus *input* sama besar dengan arus induktor seperti yang terlihat pada Gambar 2.18, hal ini menyebabkan rangkaian *boost converter* tidak begitu membutuhkan filter pada *input* seperti halnya pada rangkaian *buck converter*.

## 2.6. PRINSIP CHARGING BATERAI LI-ION

Charger baterai Li-ion merupakan sebuah divais pembatas tegangan (*voltage regulator*) yang sama, seperti pada sistem baterai asam timbal (*lead acid*). Perbedaan antara keduanya terletak pada nilai tegangan yang lebih besar per *cell*, toleransi tegangan yang lebih ketat dan tidak adanya *trickle and float of charge* pada kondisi *full charge*. Sistem *charging* pada baterai Li-ion membutuhkan nilai tegangan yang tepat dan penambahan rating pada sistem *charging* hanya akan membebani baterai.

Kebanyakan *cell* pada Li-ion membutuhkan muatan 4,20 V/*cell* dengan toleransi tiap *cell* +/- 50 mV/*cell*. Nilai tegangan yang lebih tinggi bisa meningkatkan kapasitas baterai namun oksidasi pada *cell* hanya akan mengurangi umur kerja baterai. Yang lebih penting diperhatikan adalah saat muatan *charging* melebihi 4,20 V/*cell*. Gambar 2.20 menunjukkan nilai tegangan dan arus saat sebuah baterai *Li-ion* melalui tahap *constant current* dan *topping charge*.



Gambar 2.19 Tahapan *charging* baterai Li-ion [19]

Baterai Li-ion berada dalam keadaan *fully charged* saat nilai arus yang terukur pada baterai jatuh pada di bawah level nilai yang telah ditentukan atau jatuh pada *Stage 2* pada Gambar 2.20. Pada kondisi *trickle charge*, beberapa *charger* melakukan *topping charge* saat terjadi jatuh tegangan ke nilai 4,05 V/cell (pada *Stage 4* di Gambar 2.20).

Nilai muatan yang dibutuhkan baterai Li-ion yang umum diproduksi sekitar 0,5 dan 1 C pada *Stage 1* pada Gambar 2.20, dan lamanya waktu *charging* adalah sekitar 3 jam. Pabrik-pabrik umumnya merekoendasikan nilai muatan 0,85 C atau lebih kecil untuk 18650 *cell* (3.6V, 2400mAh Li-ion *Cell*). Kondisi *full charge* pada baterai Li-ion tercapai saat baterai mencapai nilai *voltage threshold* dan arus jatuh di bawah nilai tiga persen dari *rating* arus yang ditentukan *charger*. Baterai juga bisa dikatakan penuh, saat nilai arus jatuh dan tidak bisa turun lebih jauh lagi.

Dengan menaikkan arus *charging*, proses *charging* tidak akan bertambah cepat dengan signifikan. Walaupun baterai akan mencapai tegangan puncak lebih cepat dengan *fast charge* namun *saturation charge* akan membutuhkan waktu yang lebih lama. Jumlah arus yang diberikan saat *charging* hanya akan merubah waktu yang dibutuhkan untuk tiap *stage*; *Stage 1* akan lebih pendek namun *Stage 2*

untuk *saturation charging* akan lebih lama. Arus *charging* yang tinggi tetap akan mengisi baterai hingga penuh lebih cepat 70% dibanding nilai arus yang disarankan.

Baterai Li-ion tidak harus di-*charging* hingga penuh, tidak seperti pada baterai asam timbal. Bahkan sebenarnya lebih baik untuk tidak mengisi baterai hingga benar-benar penuh karena nilai tegangan yang tinggi malah akan membebani baterai. Dengan menghindari *fully charged* maka akan dapat memperpanjang usia baterai sehingga, beberapa pabrik memproduksi Li-ion dengan nilai *charge threshold* yang lebih rendah.

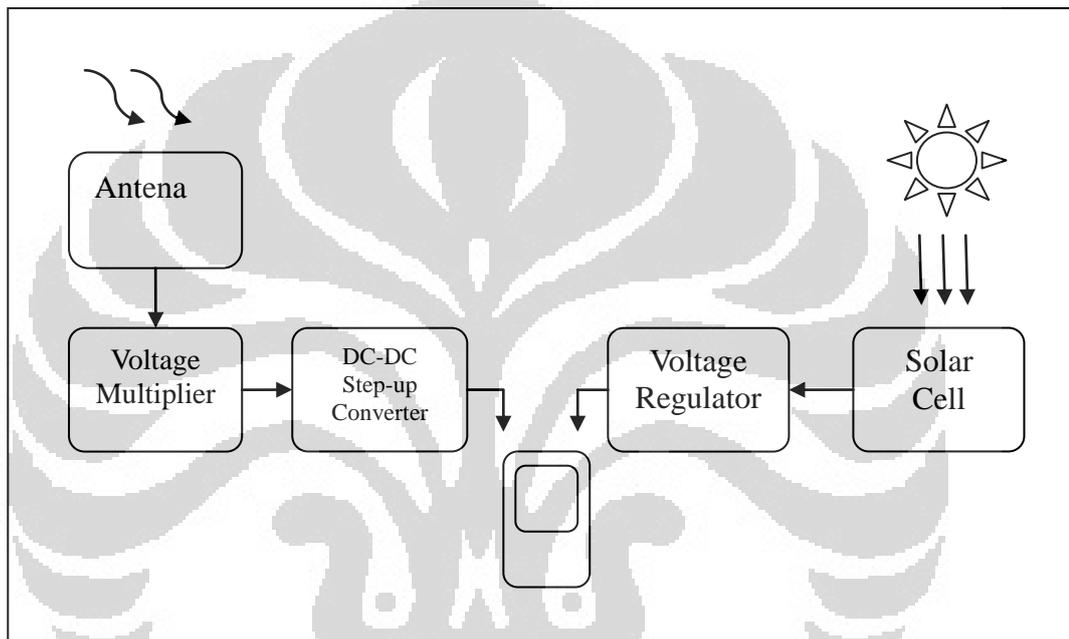
Tabel 2.1 memperlihatkan perkiraan kapasitas untuk baterai Li-ion saat di-*charging* dengan nilai *voltage threshold* yang berbeda dengan dan tanpa arus saturasi.

Tabel 2.1. Karakteristik *charging* pada baterai Li-ion [19]

Muatan V/cell	Kapasitas saat <i>cut-off voltage</i>	Waktu <i>charging</i> (menit)	Kapasitas saat saturasi penuh
3,80	60%	120	65%
3,90	70%	135	76%
4,00	75%	150	82%
4,10	80%	165	87%
4,20	85%	180	100%

## BAB III PERANCANGAN SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS RF ENERGY HARVESTING DAN SEL SURYA

Gambaran umum sistem pembangkitan energi (*energy harvesting*) dari sinyal RF frekuensi GSM 900 MHz dan dari energi surya yang diajukan dalam skripsi ini ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Blok diagram rancangan sistem *energy harvesting*

Dari Gambar 3.1 dapat dilihat bahwa sistem yang diajukan memiliki dua buah bagian utama, yaitu sistem RF *energy harvesting* dengan sinyal GSM 900MHz sebagai sumber energi elektromagnetik dan sistem pembangkitan energi berbasis panel surya. Kedua sistem ini berdiri sendiri-sendiri dan diujikan sebagai alternatif bagi sumber energi berdaya rendah yang mendukung *mobility*, *portability* dan *availability* selama dua puluh empat jam.

Sistem RF *energy harvesting* terdiri atas antena yang berfungsi menangkap sinyal RF di frekuensi GSM 900 MHz, kemudian daya yang ditangkap antena berupa sinyal AC akan disearahkan dan dinaikkan nilainya oleh rangkaian *voltage multiplier*, kemudian sinyal DC yang didapat akan dinaikkan lagi hingga mencapai nilai tegangan yang konstan yang dibutuhkan untuk *men-charging handphone*

menggunakan rangkaian DC-DC *step-up converter*.

Sistem pembangkitan energi berbasis panel surya terdiri atas panel surya untuk mengonversi energi dari foton menjadi daya DC, kemudian daya ini akan diatur hingga mencapai nilai tegangan konstan yang dibutuhkan untuk *charging handphone* menggunakan rangkaian *voltage regulator*.

### 3.1. RANCANGAN SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS RF ENERGY HARVESTING

#### 3.1.1. ANTENA

Antena merupakan bagian penting dalam sistem RF *energy harvesting*. Antena digunakan untuk menangkap sinyal RF pada frekuensi tertentu dari udara bebas untuk kemudian disearahkan dan diperbesar oleh rangkaian *voltage multiplier*. Persyaratan utama dalam pemilihan antena yang akan digunakan dalam skripsi ini adalah kemampuannya dalam menangkap sinyal dalam lebar GSM 900 MHz. Pemakaian sinyal GSM 900 MHz di Indonesia menggunakan frekuensi mulai dari 890 MHz sampai ke frekuensi 960 MHz [19]. Oleh karena itu dibutuhkan antena *receiver* dengan lebar *bandwidth* 70 MHz, untuk bisa menangkap semua sinyal GSM 900 MHz. Pertimbangan selanjutnya dalam pemilihan jenis antena yang digunakan dalam sistem adalah kemudahan dan kesederhanaan dalam perancangan dan fabrikasinya. Kesederhanaan dalam disain diperlukan untuk mempersempit batas rumusan masalah dalam skripsi ini, begitu juga kemudahan dalam fabrikasi. Pendisainan antena secara khusus akan menjamin didapatnya antena dengan performa dan efisiensi yang lebih baik untuk sistem RF *energy scavenging*, namun usaha ini akan memerlukan perhatian lebih dan batasan masalah yang lebih spesifik. Oleh karena itu, antena jenis dipole dipilih dalam sistem yang dibahas dalam skripsi karena alasan-alasan tersebut. Antena dipole disebut juga antena dipole setengah gelombang (*half-wavelength dipole*) karena panjang konduktor yang diperlukan untuk membuat antena ini merupakan setengah dari nilai panjang gelombang frekuensi sinyal yang diinginkan.

Jika frekuensi yang diinginkan pada 900 MHz, maka mengikuti

Persamaan 2.2, besar panjang gelombangnya adalah 0,33 meter. Untuk membuat antena dipole setengah gelombang maka akan dibutuhkan konduktor sepanjang kurang lebih 0,167 meter. Antena dipole terdiri dari dua buah batang konduktor, maka untuk setiap batang konduktor akan memiliki panjang kira-kira 0,083 meter untuk membentuk antena dipole setengah gelombang untuk frekuensi 900 MHz. Panjang tiap batang konduktor untuk antena dipole memenuhi  $\lambda/4$ . Konduktor yang dipakai terbuat dari tembaga dengan diameter kira-kira 5 mm. Antena dipole dibuat di Type N-connector. Antena dipole yang telah dibuat dan digunakan dalam sistem ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Antena dipole yang digunakan dalam sistem

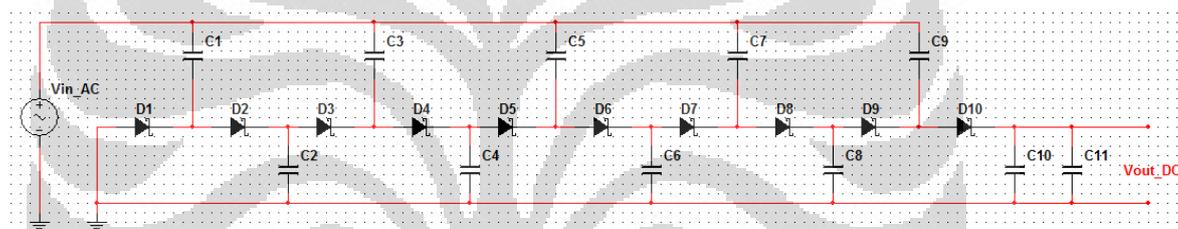
Antena yang telah dibuat kemudian di-*tunning* dan dites menggunakan *Network Analyzer*. Ini bertujuan untuk mengecek apakah antena yang telah dibuat mampu bekerja di frekuensi 900 MHz.

Penguatan (*gain*) maksimum antena dipole  $\lambda/2$  secara teori sebesar  $10 \log 1,64$  or 2,15 dBi [21]. Umumnya antena yang dibuat di Type N-connector memiliki besar impedansi sebesar 50 Ohm.

### 3.1.2. RANGKAIAN CHARGE PUMP

Rangkaian *charge pump* pada sistem bertindak sebagai penyearah dan pengganda besar tegangan AC yang bervariasi terhadap waktu dari sinyal RF

menjadi tegangan DC. Rangkaian *charge pump* ditentukan supaya bisa menghasilkan besar tegangan DC yang mampu men-charge baterai Li-ion secara langsung maupun saat terpasang pada *handphone*. Rangkaian *charge pump* yang digunakan pada rancangan sistem adalah rangkaian *voltage doubler* dengan *n-stage*. Gambar 3.3 menunjukkan rangkaian *voltage multiplier* dengan susunan *Dickson* [22] dengan *5-stages*. Pemakaian rangkaian *voltage multiplier* dapat dilakukan dengan beberapa bentuk susunan, seperti Villard, Dickson, Resonant Villard dan Resonant Dickson [22]. Berangkat dari hasil simulasi yang dipublikasikan oleh Sogorb, Llario, Pelegri, Lajara dan Alberola [22], maka digunakan susunan Dickson dalam sistem ini, karena susunan Dickson relatif lebih baik dalam penggunaan untuk sistem bertegangan rendah seperti pada sistem *RF energy scavenging* ini.



Gambar 3.3 Rangkaian *charge pump* Dickson dengan *5-stages* [3]

### 3.1.2.1. Pemilihan Jumlah Stage

Jumlah *stage* pada rangkaian seperti telah didiskusikan di bab sebelumnya berbanding lurus dengan besar tegangan *ouput* yang dihasilkan. Pemilihan jumlah *stage* yang dipakai pada rangkaian uji akan dipengaruhi besar daya *input* yang tersedia. Berdasarkan teori yang telah dibahas di bab sebelumnya diketahui bahwa untuk jumlah *stage* yang semakin banyak akan semakin besar pula nilai tegangan DC yang dihasilkan rangkaian *voltage multiplier*. Namun akan ada batasan pada jumlah *stage* yang bisa dipakai pada rangkaian. Batasan yang dimaksud adalah Hukum Ohm, jika besar tegangan yang dihasilkan semakin besar maka akan nilai arus yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Selain itu, jumlah *stage* yang semakin banyak berarti rugi-rugi yang muncul selama proses di sepanjang *stage* juga akan semakin banyak. Oleh sebab itu, pada

sistem ini digunakan rangkaian *voltage multiplier* dengan *5-stages* untuk memastikan bahwa nilai tegangan *output* cukup besar namun tidak terlalu mengorbankan nilai arus *output* yang dihasilkan.

### 3.1.2.2. Pemilihan Jenis Dioda

Sinyal RF 900 MHz memiliki frekuensi yang tinggi dan terpancar dengan besar daya yang sangat dibatasi, begitu pula dengan daya sinyal RF yang bisa ditangkap dari udara bebas oleh antena yang paling efisien pun akan relatif kecil mengingat banyaknya rugi-rugi di udara bebas, karena itu diperlukan dioda dengan besar tegangan *threshold* yang kecil dan bisa bekerja pada frekuensi tinggi. Dioda Schottky menjadi pilihan yang paling tepat dikarenakan alasan-alasan tersebut. Dioda Schottky menggunakan *metal-semiconductor junction* alih-alih *semiconductor-semiconductor junction* yang umumnya digunakan pada jenis dioda biasa. Penggunaan *metal-semiconductor* pada *junction* ini akan membuat *junction* mampu bekerja lebih cepat dan memberikan tegangan *threshold* mulai dari 0,15 V sampai 0,5 V, rentang ini lebih kecil dibandingkan tegangan *threshold* dioda biasa yang rentangnya sekitar 0,7 – 1,7 V [23]. Pada sistem yang diajukan penulis, dioda Schottky yang digunakan adalah dioda Schottky HSMS 2820 dari Agilent. Dioda Schottky HSMS 2820 dari Agilent memiliki tegangan *threshold* sebesar 0,34 V dan mampu bekerja hingga frekuensi gelombang 4 GHz.

### 3.1.2.3. Pemilihan Nilai Kapasitor

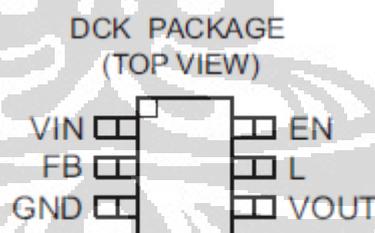
Berdasarkan Persamaan (2.23), pada frekuensi yang semakin tinggi untuk mendapatkan nilai tegangan output yang semakin besar diperlukan nilai kapasitor yang semakin kecil. Meskipun demikian, nilai kapasitor yang makin besar pada rangkaian *voltage multiplier* berarti makin besar pula energi yang bisa disimpan, namun dengan kompensasi waktu *transient* yang semakin lama. Penggunaan nilai kapasitor dalam rangkaian *voltage multiplier* ini mengikuti nilai yang telah diuji dalam referensi [3], yaitu sebesar 0,47 nF. Kemudian, sebuah kapasitor ditambahkan sebelum

beban untuk mengurangi *ripple* yang muncul pada tegangan *output*. Jika nilai kapasitor tambahan ini semakin besar, maka tegangan *output* akan lebih stabil namun dengan kompensasi waktu *transient* yang lebih lama. Kapasitor tambahan yang digunakan dipilih sebesar 220 nF.

### 3.1.3. RANGKAIAN STEP-UP CONVERTER

Rangkaian *step-up converter* diperlukan dalam sistem RF *energy harvesting* untuk memperbesar nilai tegangan yang dihasilkan rangkaian *voltage multiplier*. Rangkaian DC-DC *step-up converter* ini merupakan jenis *switching regulator* yang disebut juga *boost regulator*. *Boost regulator* diperlukan pada sistem untuk memperbesar nilai tegangan menjadi 5 V, dimana nilai ini adalah nilai yang dibutuhkan untuk men-*charging* baterai *handphone*.

Dalam skripsi ini, digunakan rangkaian *boost regulator* berupa IC TPS61222 dari Texas Instruments. TPS61222 merupakan *step-up converter* yang bisa bekerja dengan besar tegangan *input* mulai dari 0,7 V. Dengan besar tegangan input sebesar 0,7 V; diharapkan IC ini bisa menghasilkan tegangan *output* yang nilainya tetap 5 V walaupun terjadi perubahan nilai keluaran *voltage multiplier* akibat bervariasinya besar daya sinyal RF yang bisa ditangkap antena. Bentuk dan pin-pin pada IC TPS61222 ditunjukkan Gambar 3.4.



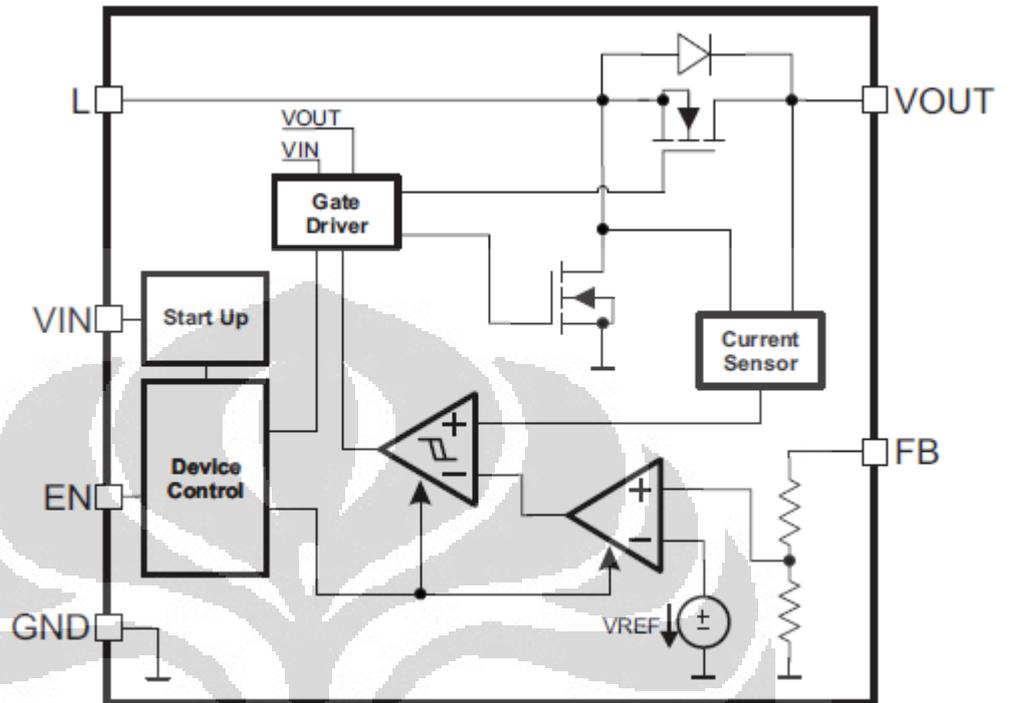
Gambar 3.4 Bentuk dan pin-pin pada TPS61222 [24]

Beberapa karakteristik TPS61222 antara lain [24]:

- Efisiensi mencapai 95% pada kondisi operasi standar.
- Bekerja dengan besar tegangan input mulai dari 0,7 V.
- Tegangan keluaran konstan di 5 V.
- Arus switching minimum sebesar 200 mA.
- Mempunyai perlindungan terhadap kelebihan tegangan output.
- Mempunyai perlindungan terhadap kelebihan temperatur.

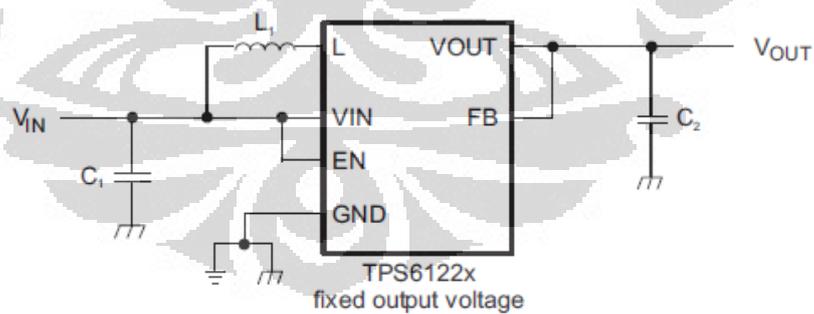
- Didisain dalam ukuran kecil 6-pin SC-70 package.

Blok diagram fungsional IC TPS6122 ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Blok diagram fungsional TPS6122 [24]

Adapun skema rangkaian pemakaian TPS6122 diberikan oleh *datasheet* IC bersangkutan dan ditunjukkan oleh Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema rangkaian pemakaian TPS6122 [24]

Dimana nilai  $L_1$  yang digunakan adalah  $4,7 \mu\text{H}$ ;  $C_1$  dan  $C_2$  sebesar  $10 \mu\text{F}$ .

## 3.2. RANCANGAN SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS SEL SURYA

### 3.2.1. SEL SURYA

Sel surya yang digunakan dalam sistem ini haruslah bisa memenuhi spesifikasi besar tegangan dan arus yang dibutuhkan untuk men-*charging* baterai Li-Ion. Untuk baterai Li-Ion yang umumnya digunakan pada *handphone* standar membutuhkan tegangan di atas 3,7 V dan arus yang tidak melebihi 700 – 800 mA (tergantung merk *handphone*) untuk men-*charging* baterai. Spesifikasi nilai tegangan dan arus ini kira-kira setara dengan besar daya sekitar 4 Watt. Sel surya yang akan digunakan haruslah memenuhi kriteria tersebut, sehingga modul sel surya STP0055S-12/Db dari SWISSCO SOLAR-lah yang dipilih. Adapun spesifikasi dari modul sel surya ini ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data kelistrikan modul sel surya SWISSCO SOLAR STP0055S12/Db

Parameter Kelistrikan	Nilai*
Rated Maximum Power ( $P_{max}$ )	5 W
Current at Pmax ( $I_{mp}$ )	0,30 A
Volatge at Pmax ( $V_{mp}$ )	16,8 V
Short-Circuit Current ( $I_{sc}$ )	0,33 A
Open-Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )	21,4 V
Nominal Operating Cell Temp.	50° C
Maximum Sytem Volatge	715 V
Maximum Series Fuse Rating	1 A

\*Standard Test Condition (STC): level irradiansi 1000 W/m<sup>2</sup>, spektrum AM 1,5 dan temperatur sel surya 25°C.

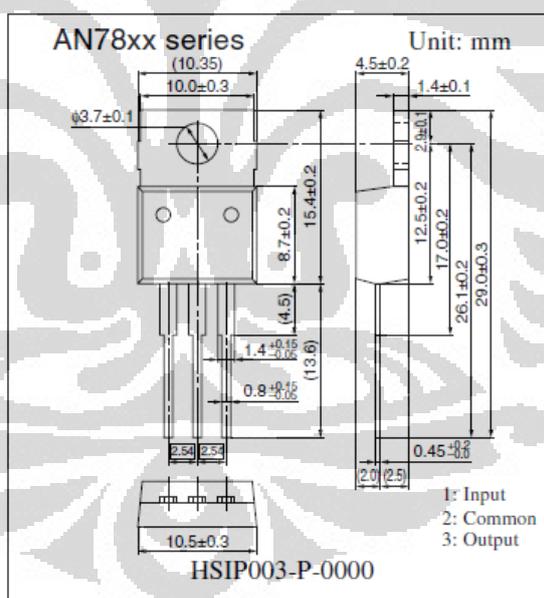
### 3.2.1. VOLTAGE REGULATOR

Rangkaian *voltage regulator* dibutuhkan dalam sistem *charging handphone* berbasis tenaga surya ntuk menjaga nilai tegangan yang masuk ke *handphone* selalu bernilai tetap, karena nilai tegangan yang dihasilkan sel surya akan berubah-ubah tergantung kondisi irradiansi matahari. Jika

nilai tegangan yang masuk ke baterai *handphone* tidak tetap, maka akan dapat merusak *handphone*.

Pada sistem yang diajukan di skripsi ini digunakan *linear voltage regulator* berupa IC seri AN78xx dari Matshushita Panasonic. Seri AN78xx merupakan *voltage regulator* yang bisa menurunkan nilai tegangan, dengan kedua angka terakhir di nomor seri menunjukkan nilai tegangan keluaran yang bisa diregulasi IC tersebut.

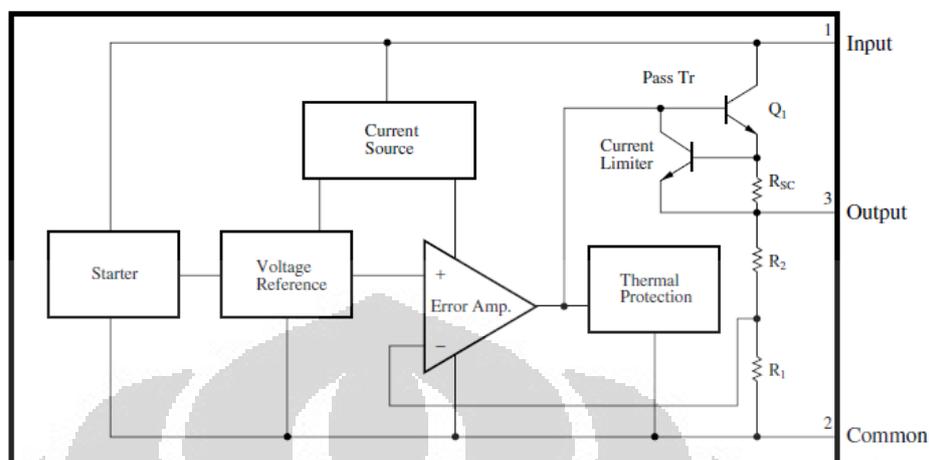
Sel surya yang digunakan mampu menghasilkan tegangan mencapai 21,4V. Dalam sistem ini, digunakan dua buah IC regulator untuk meregulasi tegangan *output* panel surya sebelum digunakan untuk *charging handphone*. Regulasi dua tingkat ini bertujuan untuk mengurangi suhu kerja IC *voltage regulator*, supaya IC lebih tahan panas saat harus bekerja *charging* baterai *handphone* dalam waktu yang lama. Bentuk IC AN78xx yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



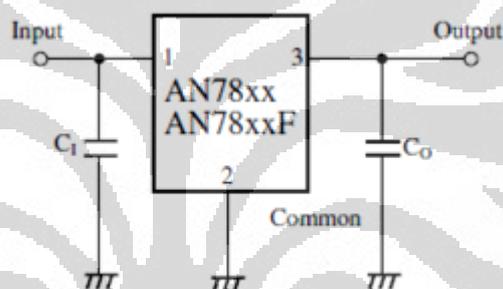
Gambar 3.7 IC *voltage regulator* seri AN78xx [25]

Beberapa karakteristik dari AN78xx ini antara lain tidak membutuhkan komponen eksternal tambahan, tersedia dengan tegangan *output* teregulasi mulai dari 5 V-10 V, 12 V, 15 V, 18 V, 20 V dan 24 V, mempunyai perlindungan *built-in* terhadap *overcurrent*, *thermal overload* dan mempunyai ASO (*Area of Safe Operation*) *Circuit*. Blok diagram

AN78xx ditunjukkan oleh Gambar 3.8. Adapun rangkaian pemakaian AN78xx ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3.8 Blok diagram AN78xx [25]



Gambar 3.9 Rangkaian pemakaian AN78xx [25]

Pemakaian IC AN78xx membutuhkan tambahan dua buah kapasitor yang fungsinya seperti yang ditunjukkan Gambar 3.9. Besar kapasitor C1 yang dianjurkan *datasheet* adalah sebesar  $0,33 \mu\text{F}$  dan C2 sebesar  $0,1 \mu\text{F}$  [25].

Pada sistem ini, digunakan AN7810 yang mampu meregulasi tegangan keluaran langsung dari panel surya menjadi tegangan tetap sebesar 10 V, kemudian tegangan 10 V akan diregulasi oleh AN7805 menjadi tegangan dengan nilai yang konstan di 5 V. Tegangan 5 V ini bisa langsung diberikan untuk men-*charging* baterai *handphone* tanpa perlu khawatir akan adanya *overcurrent*, karena modul sel surya yang digunakan hanya mampu menghasilkan arus maksimum sebesar 300 mA, dimana nilai ini jauh di bawah nilai arus maksimum untuk *charging* baterai Li-Ion pada *handphone* yang sebesar 700 mA. Permasalahan yang terkait arus

yang harus diperhatikan adalah perubahan nilai arus seiring perubahan irradiansi matahari.

### 3.3. SPESIFIKASI DAYA HANDPHONE LG KG-207

Daya yang didapatkan dari sistem *energy scavenging* sinyal RF GSM 900MHz dan dari energi matahari akan digunakan untuk mengisi muatan baterai pada *handphone*, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem didisain berdasarkan persyaratan daya untuk men-*charging* baterai *handphone*.

Jenis *handphone* yang digunakan dalam skripsi adalah *handphone* keluaran LG dengan seri KG-207. Handphone ini merupakan jenis *handphone* standar yang mendukung proses telepon, pengiriman pesan singkat (SMS) dan beberapa aplikasi standar seperti radio FM dan *browsing* berbasis GPS. Meskipun hanya mampu mendukung proses telekomunikasi standar, *handphone* ini memiliki tampilan layar warna dan teknologi suara polyphonic. *Handphone* LG KG-207 ini mempunyai sumber daya berupa baterai jenis *Lithium Ion* yang bisa diisi ulang.

Setiap baterai Li-Ion memiliki spesifikasi *set-voltage* dan arus maksimum yang berbeda-beda tergantung pabrik yang memproduksinya. Untuk *handphone* LG KG-207 ini baterai Li-ion yang digunakan adalah baterai produksi LG sendiri, *handphone* dan baterai ditunjukkan Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Handphone* dan baterai Li-ion produksi LG pada *handphone* LG KG-207 [26]

Dari kemasakan baterai diketahui bahwa baterai ini memiliki tegangan keluaran sebesar 3,7 V dan arus keluaran sebesar 750 mAh. Dari *charger* yang menyertai baterai diketahui bahwa tegangan yang harus diberikan untuk mengisi baterai adalah sebesar 5,1 V dan arus maksimum sebesar 700 mA. Nilai-nilai tersebut akan menjadi spesifikasi yang akan menentukan berapa besar arus dan tegangan yang harus dihasilkan sistem *RF energy harvesting* dan sistem tenaga surya untuk mengisi baterai. Adapun untuk nilai hambatan dalam baterai tidak ada sumber yang menyediakan informasi tersebut. Namun, jika mengasumsikan data nilai keluaran baterai merupakan nilai yang memenuhi kondisi baterai saat penuh (*fully-charged*), maka dengan hukum Ohm, hambatan dalam baterai saat terisi penuh ( $R_{\text{penuh}}$ ) dapat diketahui bernilai 4,933 Ohm ( $\sim 5$  Ohm). Dengan cara yang sama, mengasumsikan data nilai arus dan tegangan yang harus diberikan untuk mengisi baterai sebagai nilai yang memenuhi kondisi baterai saat kosong, maka hambatan dalam baterai saat kosong ( $R_{\text{kosong}}$ ) dapat diketahui bernilai 7,285 Ohm ( $\sim 7$  Ohm).

Pada sistem yang diajukan di skripsi ini proses *charging* dilakukan saat baterai telah terpasang pada *handphone*, dengan demikian proses *charging* akan bisa diamati melalui indikator *charging* yang umumnya terdapat pada setiap *handphone*.

## BAB IV SIMULASI

Pada bab ini, sistem catu daya untuk telepon seluler berbasis RF *energy harvesting* dan sel surya yang telah dirancang akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak. Hasil simulasi ini berupa parameter-parameter kelistrikan yang dianalisis untuk melihat unjuk kerja rangkaian uji di kondisi tertentu. Hasil analisis dari simulasi yang dilakukan akan menjadi acuan dalam realisasi rancang bangun sistem yang diajukan.

### 4.1. SIMULASI SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS RF ENERGY HARVESTING

Rangkaian *voltage multiplier* yang telah dirancang akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak Multisim 11.0 dari National Instrument. Perangkat lunak yang digunakan bisa mensimulasikan kerja sistem yang diinginkan dalam kondisi yang bisa diatur.

Simulasi ini bertujuan untuk membuktikan bahwa rangkaian *voltage multiplier 5-stages* dengan dioda HSMS 2820 yang telah didesain mampu bekerja mengonversi sinyal GSM pada frekuensi 900 MHz menjadi tegangan DC.

Pada simulasi rangkaian *voltage multiplier* digunakan sumber tegangan AC dengan nilai puncak untuk menggantikan antenna *receiver* pada sistem RF *energy scavenging*, karena perangkat lunak Multisim 11.0 tidak menyediakan komponen sumber RF pada frekuensi tinggi. Untuk nilai sumber tegangan AC yang mewakili sumber sinyal GSM 900 MHz, akan ditentukan berdasarkan Persamaan 2.3.

Penguatan maksimum untuk antenna dipole ideal adalah sebesar 2 dB. Jika simulasi transmisi daya dan penerimaan daya dari sinyal RF 900 MHz dilakukan pada kondisi ideal dan terkontrol seperti di laboratorium menggunakan antenna dipole dan menggunakan sumber sinyal RF dari Network Analyzer dengan besar daya transmisi sebesar 10 dB (~ 10 W), maka berdasarkan Persamaan 2.3 besar daya yang mampu diterima antenna dipole pada jarak 5 m dari pemancar secara teori adalah sebesar,

$$P_r = 10 \text{ dB}. (2 \times 2) \text{ dB} (0.33 \text{ m} / (4 \times \pi \times 5 \text{ m}))^2 = 1.05 \text{ dB}$$

Nilai 1,05 dB yang telah dihitung diatas merupakan nilai daya ideal teoritis yang bisa diterima antenna dipole tanpa memperhitungkan rugi-rugi (*losses*). Nilai ini akan berkurang jika besar rugi-rugi akibat transmisi di udara perkotaan, rugi-rugi akibat buruknya performa antenna, rugi-rugi akibat buruknya *impedance matching* antara antenna dan rangkaian *voltage multiplier* dan rugi-rugi konduktor dimasukkan dalam pertimbangan. Namun, untuk tujuan pembuktian rangkaian *voltage multiplier* bisa bekerja, nilai tegangan puncak input AC sebesar 0,5 V akan diasumsikan dalam simulasi ini.

Dioda Schottky HSMS 2820 digunakan dalam sistem RF *energy scavenging* ini. Namun, perangkat lunak Multisim 11.0 tidak menyediakan model komponen dioda Schottky HSMS 2820 dalam basis datanya, sehingga untuk menyimulasikan rangkaian *voltage multiplier* ini, dioda Schottky HSMS 2820 perlu dimodelkan sendiri dan dimasukkan ke basis data agar bisa disimulasikan. Untungnya, perangkat lunak Multisim 11.0 menyediakan fitur *Component Wizard* untuk permodelan komponen berbasis SPICE. Dengan memasukkan parameter-parameter SPICE seperti yang ditunjukkan Tabel 4.1 [28], dioda Schottky HSMS 2820 bisa disimulasikan di Multisim 11.0.

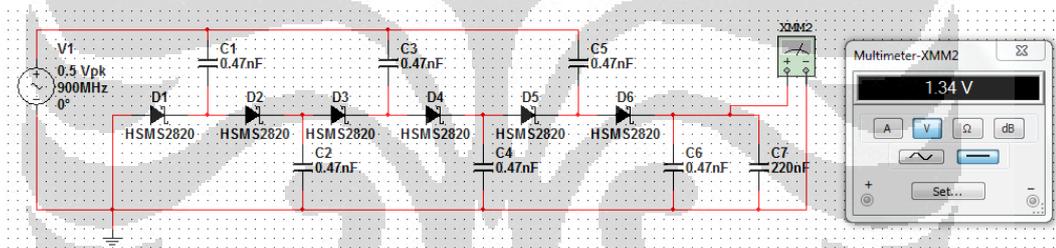
Tabel 4.1 Parameter SPICE dioda Schottky HSMS 2820

Parameter	Satuan	Nilai
BV ( $V_{br}$ )	V	9
$C_{JO}$	pF	0,7
$E_G$	eV	0,69
$I_{BV}$	A	10e-4
$I_S$	A	2,2e-8
N	-	1,08
$R_S$	Ohm	6
$P_B (V_j)$	V	0,65
PT (XTI)	-	2
M	-	0,5

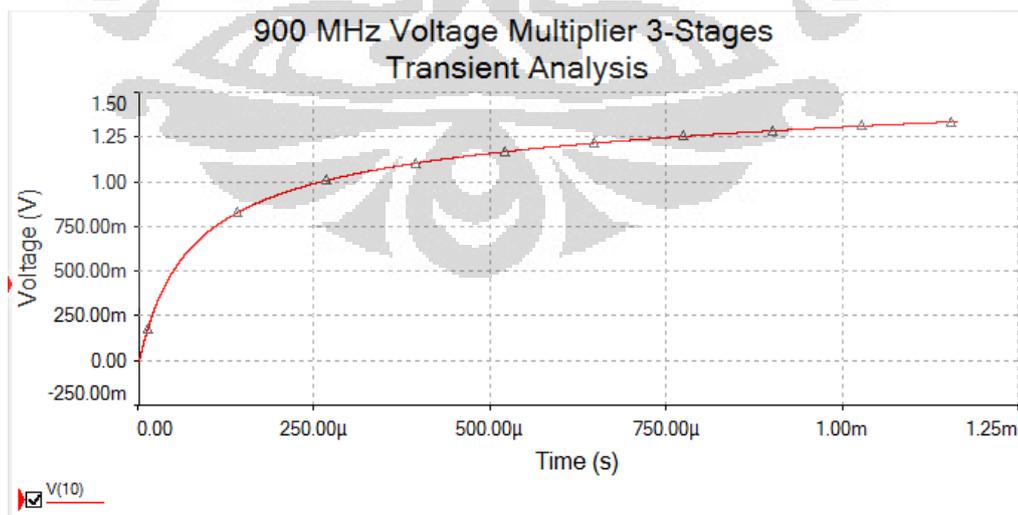
Model SPICE untuk dioda Schottky HSMS 2820 yang digunakan dalam simulasi ini, yaitu sebagai berikut:

```
.MODEL HSMS2820 d
+IS=2.2000e-08 RS=6 N=1.08 EG=0.69
+XTI=2 BV=9 IBV=10.00e-04 CJO=0.7e-12
+VJ=0.65 M=0.5 FC=0.5 TT=0
+KF=0 AF=1
```

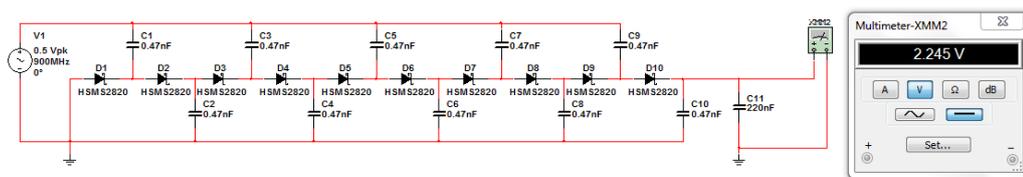
Hasil simulasi rangkaian *voltage multiplier 3-stages* ditunjukkan oleh Gambar 4.1 . Gambar 4.2 menunjukkan analisa transien dari rangkaian uji *voltage multiplier 3-stages*. Gambar 4.3 menunjukkan hasil simulasi dari rangkaian uji *voltage multiplier 5-stages* dan Gambar 4.4 . menunjukkan analisa transien dari rangkaian uji *voltage multiplier 5-stages*.



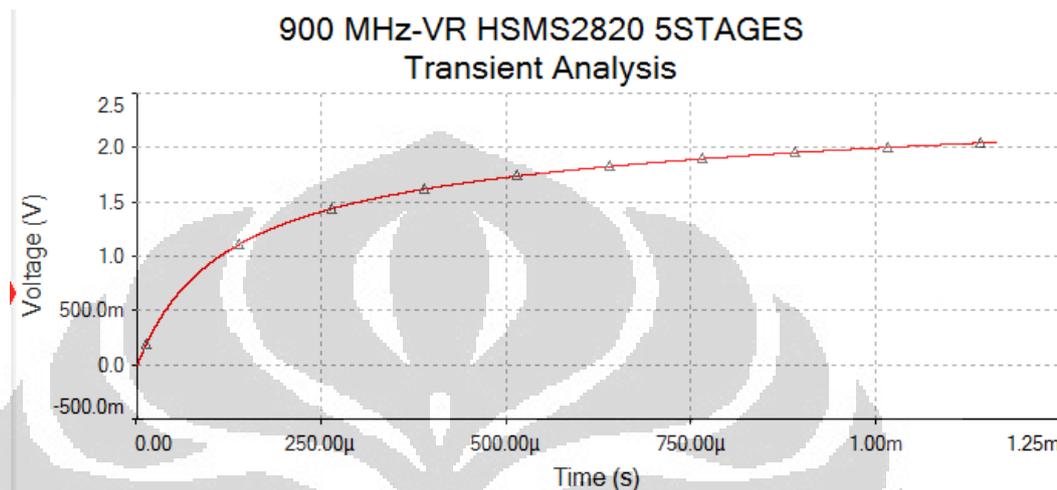
Gambar 4.1 Simulasi rangkaian *voltage multiplier 3-stages* dengan gelombang AC 900MHz



Gambar 4.2 Analisa transient rangkaian *voltage multiplier 3-stages* dengan gelombang AC 900 MHz



Gambar 4.3 Simulasi rangkaian *voltage multiplier* 5-stages dengan gelombang AC 900MHz



Gambar 4.4 Analisa transient rangkaian *voltage multiplier* 5-stages dengan gelombang AC 900 MHz

Hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa rangkaian *voltage multiplier* mampu menghasilkan tegangan DC dari *input* AC dan dengan besar *output* yang jauh lebih besar dibanding besar tegangan puncak *input* AC-nya. Pengaruh jumlah *stage* terhadap nilai tegangan *output* dibuktikan melalui perbandingan hasil simulasi rangkaian *voltage multiplier* 3-stages dengan hasil simulasi rangkaian *voltage multiplier* 5-stages. Hasil simulasi rangkaian *voltage multiplier* 3-stages. Besar tegangan AC input sebesar 0,5 V mampu dikonversi menjadi tegangan DC sebesar 1,34 V oleh rangkaian *voltage multiplier* 3-stages dan menjadi tegangan DC sebesar 2,245 V oleh rangkaian *voltage multiplier* 5-stages. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa jumlah *stage* berbanding lurus terhadap besarnya tegangan *output* pada tingkat tertentu.

Hasil simulasi yang ditampilkan pada bagian ini membuktikan bahwa proses pengonversian sinyal GSM 900 MHz dimungkinkan secara teoritis menggunakan rangkaian *voltage multiplier* dengan dioda HSMS 2820.

Mengikuti Persamaan 2.23 maka secara teori besar tegangan yang dihasilkan rangkaian uji adalah sebesar:

$$V_3 = n V_{in} = 3(0,5 V) = 1,5 V$$

$$V_5 = n V_{in} = 5(0,5 V) = 2,5 V$$

Membandingkan nilai tegangan *output* hasil simulasi dengan nilai yang didapat dari perhitungan berdasarkan teori, dilihat adanya perbedaan nilai tegangan sebesar:

$$\Delta V_{3-stages} = V_{out\ hitung} - V_{out\ simulasi} = 1,5 V - 1,34 V = 0,16 V$$

$$\Delta V_{5-stages} = V_{out\ hitung} - V_{out\ simulasi} = 2,5 V - 2,245 V = 0,255 V$$

Perbedaan nilai tegangan sebesar 0,16 V untuk rangkaian *voltage multiplier 3-stages* dan 0,255 V untuk rangkaian *voltage multiplier 5-stages* bisa disebabkan oleh rugi-rugi akibat nilai kapasitansi parasitik dioda dan arus saturasi balik yang muncul saat dioda bekerja. Rugi-rugi ini bisa muncul saat simulasi kemungkinan disebabkan oleh permodelan dioda yang tidak terlalu tepat. Hasil yang lebih baik akan muncul saat simulasi, jika dioda bisa dimodelkan dengan lebih baik dan terperinci. Nilai tegangan *output* hasil perhitungan belum memperhitungkan pengaruh nilai tegangan *threshold* dioda, jika nilai ini dimasukkan dalam perhitungan, maka nilai tegangan secara teori akan lebih kecil daripada yang telah dihitung. Namun hal ini tidak mengurangi pembuktian yang telah ditunjukkan.

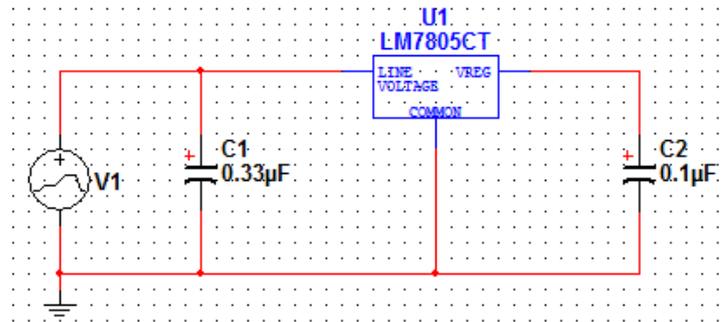
#### 4.2. SIMULASI SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS SEL SURYA

Pada bagian ini akan disimulasikan rangkaian *voltage regulator* menggunakan perangkat lunak Multisim 11.0 dari National Instrument. Simulasi ini bertujuan untuk melihat apakah rangkaian *voltage regulator* mampu meregulasi tegangan keluaran sel surya yang berubah-ubah terhadap irradiansi matahari menjadi tegangan yang nilainya tetap sebagai masukan untuk proses *charging* baterai *handphone*.

Setiap modul sel surya memiliki rating untuk nilai  $V_{oc}$  dan  $I_{sc}$ -nya. Namun, kedua nilai ini akan berubah-ubah jika dilakukan pengukuran di bawah sinar matahari dikarenakan kondisi irradiansi matahari yang juga berubah-ubah. Pada perangkat lunak Multisim 11.0 tidak tersedia komponen yang bisa memodelkan sebuah panel surya. Untuk memodelkan karakteristik panel surya yang memiliki nilai tegangan keluaran yang selalu berubah-ubah, dalam simulasi ini digunakan sumber DC *piecewise linear voltage*, dimana komponen sumber ini memiliki nilai keluaran yang berubah-ubah terhadap waktu dan bisa diatur sendiri nilainya. Penulis telah beberapa kali melakukan pengambilan data mengenai karakteristik  $V_{oc}$  dan  $I_{sc}$  modul sel surya yang digunakan dalam skripsi ini. Untuk nilai tegangan sumber DC *piecewise linear voltage* yang mewakili panel surya digunakan nilai  $V_{oc}$  yang telah diukur penulis pada tanggal 6 Juni 2011 (Lampiran1). Nilai tersebut diambil untuk setiap lima menit selama satu jam dengan kondisi lumen yang berbeda-beda.

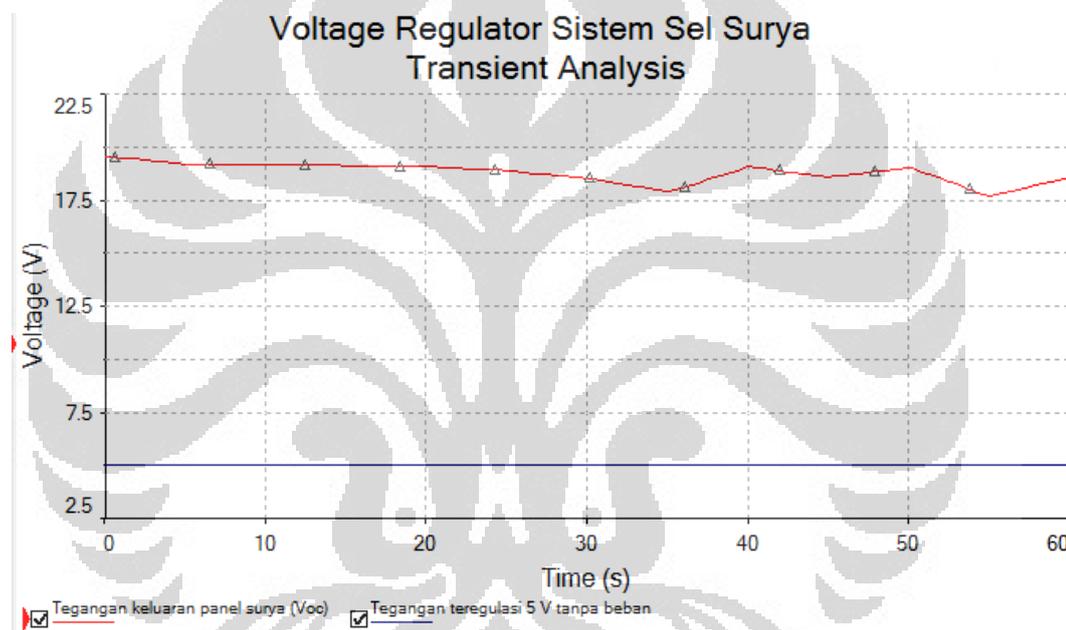
Untuk rangkaian *voltage regulator*, penulis memilih menggunakan seri IC AN78xx keluaran Matsushita Panasonic karena IC ini merupakan IC *voltage regulator* yang mudah ditemukan. Namun, karena perangkat lunak Multisim 11.0 tidak menyediakan komponen permodelan untuk IC keluaran Panasonic, penulis menggunakan seri IC LM78xx yang diproduksi oleh National Instrument. Rating dasar untuk semua IC *voltage regulator* 78xx hampir sama, yang membedakannya adalah pabrikan yang memproduksinya yang ditandai dengan dua huruf awal (AN untuk Panasonis, LM untuk National Instrument). Untuk tujuan pembuktian melalui simulasi, penggunaan LM78xx dalam simulasi dapat mewakili seri IC AN78xx yang digunakan.

Rangkaian uji simulasi untuk meregulasi tegangan keluaran sel surya menjadi tegangan yang konstan di nilai 5 V menggunakan LM7805 tanpa beban ditunjukkan oleh Gambar 4.5.



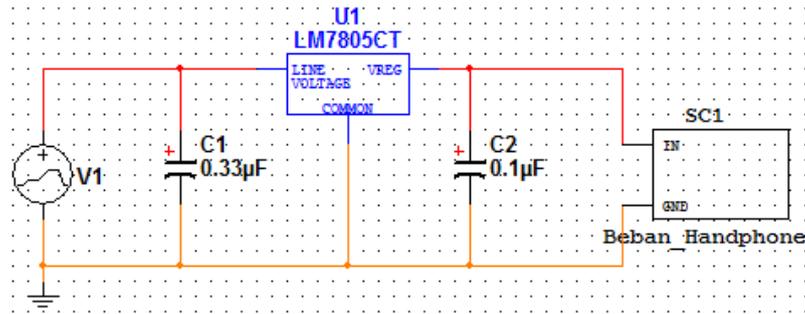
Gambar 4.5 Gambar rangkaian uji *voltage regulator* 5 V tanpa beban [25]

Hasil simulasi rangkaian uji ditunjukkan oleh Gambar 4.6.

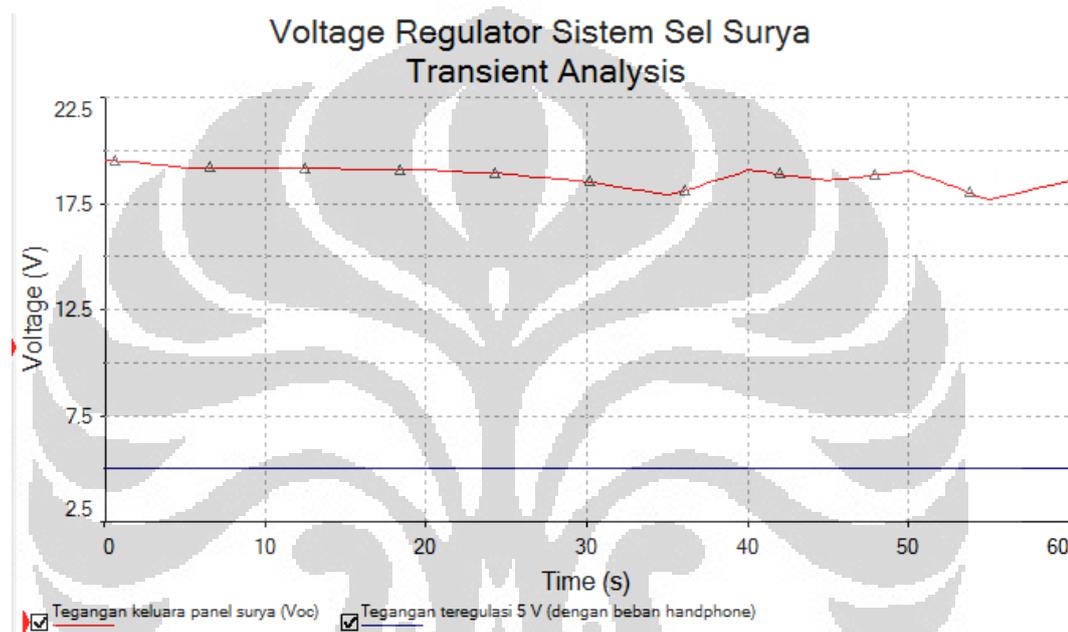


Gambar 4.6 Hasil simulasi *voltage regulator* 5 V tanpa beban

Gambar 4.6 memperlihatkan bahwa rangkaian *voltage regulator* mampu meregulasi tegangan keluaran sel surya yang berubah-ubah nilainya terhadap waktu menjadi tegangan teregulasi sebesar 5 V, saat rangkaian tidak dihubungkan dengan beban. Adapun saat rangkaian *voltage regulator* disambungkan dengan beban *handphone* ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi saat rangkaian *voltage regulator* disambungkan dengan beban *handphone*.



Gambar 4.7 Gambar rangkaian uji *voltage regulator* 5 V dengan beban [25]



Gambar 4.8 Hasil simulasi *voltage regulator* 5 V dengan beban

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa penggunaan rangkaian *voltage regulator* berbasis IC LM7805 mampu meregulasi tegangan keluaran sel surya yang bervariasi terhadap waktu dan irradiansi cahaya matahari menjadi tegangan konstan sebesar 5 V baik dalam keadaan tanpa ataupun dengan beban. Dalam realisasi rangkaian, komponen IC LM7805 akan digantikan dengan komponen AN7805 yang lebih mudah didapat. Supaya IC *voltage regulator* lebih tahan panas saat harus digunakan untuk *charging* baterai *handphone* dalam waktu yang lama, akan digunakan dua buah IC, yaitu AN7810 dan AN7805. Pembagian tingkat regulasi ini diharapkan mampu mengurangi suhu kerja tiap IC.

## BAB V UJI COBA DAN ANALISIS

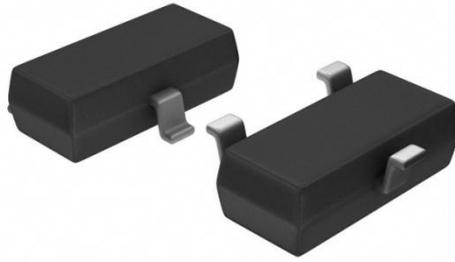
### 5.1. SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS RF ENERGY HARVESTING GSM 900 MHz

#### 5.1.1. UJI COBA

Perancangan prototipe sistem RF *energy harvesting* dari sinyal GSM 900 MHz direalisasikan dalam PCB (*Printed Circuit Board*) untuk kemudian diujikan di sekitar sumber sinyal GSM 900 MHz. Dalam uji coba rancangan, digunakan beberapa alat sebagai berikut:

1. Dua buah antena dipole dengan frekuensi kerja 900 MHz.
2. Satu buah multimeter digital (SANWA CD800a) untuk mengukur tegangan DC dari rangkaian *voltage multiplier*.
3. Rangkaian *voltage multiplier* dengan 5-stages.
4. Dua buah kabel koaksial Belden 8219 RG-58A/U dengan besar impedansi 50 Ohm. Satu buah kabel mempunyai ujung Type-N *connector* dan SMA *connector*, satu buah kabel lainnya dengan kedua ujungnya berupa SMA *connector*. Kabel koaksial digunakan untuk menghubungkan antena dengan rangkaian *voltage multiplier*. Kabel koaksial dengan besar impedansi 50 Ohm digunakan supaya nilai impedansi cocok (*match*) dengan nilai impedansi antena, sehingga akan meminimalkan rugi-rugi akibat *return loss*.

Rangkaian *voltage multiplier 5-stages* menggunakan dioda HSMS 2820, dioda ini berupa SMD (*Surface-Mounted Divais*) yang ukurannya sangat kecil (3,06 x 1,24 mm [26]), sehingga dibutuhkan ketelitian dalam pemasangan komponen dioda ke papan PCB. Gambar 5.1 menunjukkan dioda HSMS 2820 yang digunakan.



Gambar 5.1 Dioda HSMS 2820 [29]

Papan PCB didisain menggunakan perangkat lunak Protel 99 SE. Rangkaian *voltage multiplier 5-stages* yang difabrikasi ditunjukkan Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Rangkaian *voltage multiplier 5-stages*

Pengujian ini dilakukan dengan dua sumber sinyal RF yang berbeda, yaitu *Network Analyzer* dan BTS yang ada di dekat kampus Fakultas Teknik.

#### 5.1.1.1. Uji Coba dengan Sumber *Network Analyzer*

Uji coba rangkaian dengan sumber *Network Analyzer* dilakukan di ruangan AMRG (*Antenna and Microwave Research Group*) di gedung Departemen Teknik Elektro. Penggunaan sumber sinyal RF 900 MHz yang berasal dari *Network Analyzer* dimaksudkan untuk mendapatkan sumber sinyal yang dapat dikontrol. *Network Analyzer* dapat diatur sehingga bisa meradiasikan sinyal dengan level daya dan frekuensi kerja yang diinginkan melalui antena. Pada uji coba, satu buah antena dipole digunakan sebagai antena *transmitter* yang disambungkan ke *Network*

*Analyzer*, kemudian satu buah lagi disambungkan ke rangkaian *voltage multiplier* sebagai antena *receiver*. *Network Analyzer* diatur sehingga akan menghasilkan daya sebesar 10 dB dan diradiasikan pada frekuensi 900MHz. Kemudian rangkaian diuji pada berbagai variasi jarak dan pada bagian *output* rangkaian diukur besar tegangan yang dihasilkan. Namun dari hasil uji coba ini tidak ada besar tegangan yang terukur di multimeter.

#### 5.1.1.2. Uji Coba dengan Sumber BTS

Uji coba kedua dilakukan dengan sumber BTS untuk menguji kemampuan rangkaian mengonversi sinyal GSM 900 MHz yang ada di udara bebas. Sumber BTS yang dipilih adalah BTS Kampus UI yang terletak di dekat gerbang Kukusan Teknik. Pada uji coba ini hanya digunakan satu buah antena dipole yang tersambung dengan rangkaian *voltage multiplier*. Uji coba dilakukan dengan berbagai variasi jarak.

Dari hasil uji coba di luar ruangan ini terukur tegangan keluaran DC rangkaian *voltage multiplier* dengan rata-rata sebesar 0,4 V. Nilai tegangan keluaran ini selalu berubah-ubah setiap saat dan variasi perubahan semakin terlihat, jika jarak antara sumber dan rangkaian uji juga divariasikan. Dari hasil uji coba yang dilakukan, terukur tegangan terendah sebesar 0,1 V dan tegangan tertinggi mencapai 1,2 V. Perubahan nilai tegangan DC yang terukur ini bisa disebabkan karena besarnya sinyal GSM 900 MHz yang tersedia di udara juga bervariasi terhadap waktu. Gambar 5.3 menunjukkan hasil uji coba.



Gambar 5.3 Hasil uji coba *voltage multiplier 5-stages* dengan sumber BTS

Meskipun rangkaian *voltage multiplier* mampu menghasilkan tegangan DC dengan sumber BTS, nilai tegangan yang dihasilkan masih

jauh nilai yang diharapkan. Jika dibandingkan dengan nilai yang harusnya didapat secara teori sebesar 2,5 V; maka nilai rata-rata hasil uji coba ini berbeda sekitar 84 %, sedangkan dengan nilai hasil simulasi yang sebesar 2,245 V maka perbedaannya sekitar 73,8 %. Analisis hasil uji coba ini diberikan bagian selanjutnya.

### 5.1.2. ANALISIS HASIL UJI COBA

Dari hasil uji coba yang telah ditampilkan diketahui bahwa sistem RF *energy harvesting* dari sinyal GSM 900 MHz yang didisain dan difabrikasi belum memberikan hasil yang diinginkan. Buruknya performa sistem kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor yang akan dijelaskan dalam beberapa bagian berikut, kemudian dilanjutkan dengan perbaikan-perbaikan yang bisa dilakukan untuk memperbaiki performa sistem di masa yang akan datang.

#### 5.1.2.1. Analisis Dioda

Penggunaan dioda Schottky sebagai penyearah dalam rangkaian uji tidak lepas dari munculnya rugi-rugi. Rugi-rugi ini bisa muncul akibat adanya kapasitansi parasitik, arus saturasi balik (*reverse saturation current* / *reverse leakage current*) dan nilai hambatan internal pada dioda yang membatasi nilai *output* DC.

Pada operasi di frekuensi *microwave*, nilai *junction capacitance* pada dioda akan mempengaruhi besar daya maksimum yang dihasilkan rangkaian [27]. Nilai *junction capacitance* pada dioda yang tidak linear akan membuat nilai impedansi *input* rangkaian *voltage multiplier* akan berubah-ubah seiring perubahan frekuensi *input*. Perubahan nilai impedansi *input* ini kemudian akan berpengaruh terhadap besar daya yang bisa ditransfer ke beban dan besar *output* yang bisa disearahkan rangkaian *voltage multiplier* [27]. Beberapa karakteristik dioda lainnya saat beroperasi pada frekuensi kerja tinggi yang perlu diperhatikan dan mungkin berpengaruh antara lain energi harmonik yang dipantulkan pada sisi masukan dan keluaran dioda yang bisa mengurangi nilai tegangan jatuh yang melewati dioda [30].

Rugi-rugi akibat karakteristik dioda pada operasi frekuensi tinggi kemudian ditambah dengan besar daya sinyal RF yang tersedia yang

berubah-ubah terhadap waktu, pada gilirannya mungkin akan menyebabkan tegangan yang jatuh pada dioda ( $V_D$ ) lebih kecil dibandingkan dengan nilai tegangan *threshold* dioda ( $V_{th}$ ). Jika hal ini terjadi,  $V_D < V_{th}$ , maka dioda tidak akan bekerja dan rangkaian *voltage multiplier* pun tidak akan bisa menyearahkan dan memperbesar daya yang ditangkap sehingga, hal ini bisa jadi menjadi salah satu penyebab utama kecilnya besar tegangan yang diukur saat pengujian sistem RF *energy harvesting*.

#### 5.1.2.2. Analisis Antena

Besarnya daya AC yang masuk ke rangkaian *voltage multiplier* ditentukan oleh seberapa efisiennya antena yang digunakan dalam sistem RF *energy harvesting*. Sedangkan efisiensi antena sangat dipengaruhi oleh parameter *gain* antenanya sendiri [11]. Dari Persamaan 2.3 juga dapat dilihat bahwa nilai *gain* antena mempengaruhi besar daya yang bisa ditangkap antena; semakin besar nilai *gain* antena *receiver* maka akan semakin besar pula daya yang ditangkap antena.

Besar *gain* antena dipole yang telah dibuat adalah sebesar 2,51 dB dan dengan hasil yang didapat dari uji coba dapat disimpulkan bahwa sistem RF *energy harvesting* akan memberikan hasil yang lebih baik jika antena yang digunakan memiliki nilai *gain* yang lebih besar.

Antena dengan nilai *gain* yang lebih besar bisa didapatkan dengan menggunakan antena jenis lain atau dengan merancang sendiri antena yang diinginkan. Namun, di skripsi ini antena yang dibuat tidak dirancang sendiri melainkan mengikuti disain umum yang digunakan untuk membatasi ruang lingkup masalah. Perancangan antena sendiri akan bisa menghasilkan antena dengan performa yang lebih baik namun untuk merancang antena akan membuat ruang lingkup masalah di skripsi ini menjadi lebih luas.

Permasalahan terkait antena yang bisa menjadi salah satu penyebab buruknya hasil uji coba yang didapat mungkin terletak pada frekuensi kerja antena. Walaupun antena dipole yang dibuat telah ditentukan untuk bekerja di frekuensi 900 MHz, namun karena pembuatan antena dilakukan

secara manual bisa saja terjadi pergeseran frekuensi kerja saat pembuatan antena. Selain itu, ada dua buah antena dipole yang dibuat dan karena keterbatasan alat, dua buah *Network Analyzer* (NA) yang tersedia harus digunakan secara bergantian oleh banyak orang. Jadi mungkin saja ketika pembuatan antena dipole 1 digunakan NA 1 kemudian saat pembuatan antena 2 digunakan NA 2. Hal ini akan menyebabkan kalibrasi kedua antena akan sedikit berbeda satu dengan yang lain dan tidak persis berada di frekuensi 900 MHz. Saat sistem diuji coba dengan sumber NA, NA ditentukan untuk meradiasikan daya pada frekuensi antena dipole transmisi (870 MHz), namun, jika antena dipole *receiver* terkalibrasi pada frekuensi 910 MHz maka daya yang diterima antena *receiver* tidak akan sebesar jika kedua antena dipole terkalibrasi pada frekuensi yang sama. Hal ini dan ditambah pelemahan akibat berbagai faktor yang dijelaskan di analisa, bisa menjadi penyebab buruknya hasil pengukuran saat uji coba menggunakan NA sebagai sumber. Kemudian, saat uji coba dengan sumber BTS, uji coba dilakukan di ruangan terbuka di mana banyak terdapat sinyal RF pada berbagai frekuensi di udara. Antena yang dibuat tidak hanya bekerja pada satu frekuensi yang ditentukan saja, melainkan juga bisa bekerja pada frekuensi resonansi dengan jarak antar frekuensi kerja mencapai 1 GHz. Jadi saat dilakukan uji coba di ruangan terbuka, antena yang digunakan pada sistem tidak hanya menangkap sinyal pada frekuensi GSM (890-960 MHz) tapi juga menangkap sinyal RF lainnya yang ada di udara pada bermacam-macam frekuensi. Jika hal ini terjadi, maka otomatis daya yang ditangkap oleh antena sistem akan lebih banyak, sehingga rangkaian *voltage multiplier* pun akan bisa memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan saat uji coba menggunakan sumber NA.

Hasil yang ditunjukkan dalam uji coba juga bisa diakibatkan karena adanya *mismatch* antara nilai impedansi antena dan rangkaian *voltage multiplier*. Adanya *mismatch* ini akan memperbesar *return loss* sehingga daya yang masuk ke rangkaian *voltage multiplier* akan berkurang. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, nilai impedansi dioda berubah-ubah seiring dengan perubahan daya input. Variasi nilai impedansi ini akan

menyebabkan kompleksnya rangkaian *impedance matching* yang harus ditambahkan [27]. Namun, untuk perbaikan performa sistem di masa depan maka penambahan rangkaian *impedance matching* tetap diperlukan.

### 5.1.2.3. Analisis Substrate Losses

Pemakaian *substrate* dengan menggunakan *surface mount device*, seperti yang digunakan dalam sistem ini, ternyata bisa menimbulkan rugi-rugi yang bisa mengurangi besar daya keluaran pada sistem. Rugi-rugi yang disebut *substrate loss* ini merupakan rugi-rugi parasitik yang muncul akibat pengaruh jenis *substrate* PCB yang digunakan. Heikkinen dkk telah melakukan pengujian terhadap berbagai jenis *substrate* PCB dan pengaruhnya terhadap *substrate loss* yang muncul. Di dalam penelitiannya yang dipublikasikan di referensi [31], Heikkinen membuktikan bahwa dari ketiga jenis *substrate* yang diuji, yaitu RT 5870, RT 6010 dan FR4, ternyata jenis *substrate* RT 5870 lah yang memberikan *substrate loss* yang paling kecil saat digunakan dalam pemakaian *surface mount device* pada sistem berfrekuensi tinggi.

Pada sistem RF *energy harvesting* yang telah dirancang digunakan *substrate* berbahan FR4. Walaupun tidak diketahui seberapa signifikan pengaruh efek *substrate loss* terhadap daya total pada sistem, efek *substrate loss* tetap dapat dianalisa sebagai salah satu penyebab kecilnya besar tegangan yang diukur pada pengujian sistem RF *energy harvesting*.

### 5.1.2.4. Perbaikan yang Bisa Dilakukan

Dari analisa-analisa yang telah dilakukan dan studi literatur lebih lanjut, disarankan beberapa perbaikan yang dapat dilakukan untuk sistem RF *energy harvesting* yang lebih baik, antara lain:

1. Menggunakan dioda Schottky dengan tegangan *threshold*, *junction capacitance*, *series resistance* dan *reverse saturation current* yang sekecil mungkin. Bahkan jika dimungkinkan, penggunaan *zero-biased Schottky diode* akan menjamin naiknya performa dioda dalam rangkaian *voltage multiplier*.

2. Merancang sendiri antena yang digunakan dalam sistem untuk mendapatkan antena dengan efisiensi sebesar mungkin pada frekuensi kerja yang diinginkan.
3. Menambahkan rangkaian *impedance matching* pada sistem untuk memperbesar daya yang bisa masuk ke rangkaian *voltage multiplier*.
4. Menggunakan banyak (*multiple*) antena pada sistem RF energy harvesting. Penggunaan empat buah antena yang didesain sendiri dan memiliki rangkaian *voltage multiplier*-nya sendiri (jumlah *stage* pada tiap rangkaian sama) , kemudian diparalelkan antara satu dengan yang lain telah diujikan oleh Mi dkk dalam referensi [32] dan sistem mampu menghasilkan daya yang empat kali lebih besar dibandingkan penggunaan satu antena dan satu rangkaian *voltage multiplier*.
5. Menambahkan sistem penguatan tegangan yang efisien pada daya rendah untuk hasil keluaran *voltage multiplier*. Penambahan sistem penguatan tegangan yang efisien pada daya rendah akan membuat keluaran DC *voltage multiplier* lebih *feasible* untuk digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik. Penggunaan *switched capacitor DC-DC converter* seperti yang diujikan dalam publikasi [33] atau *resonant voltage booster* memanfaatkan *resonant tank* seperti yang diujikan dalam publikasi [34] mungkin bisa menjadi pertimbangan.
6. Menggunakan skema *voltage multiplier* yang menggunakan *pseudo-Schottky diode* berbasis teknologi CMOS untuk mengurangi tegangan *threshold* dioda dan meningkatkan performa dioda. Penggunaan *pseudo-Schottky diode* berbasis teknologi CMOS dibahas di publikasi [35].
7. Menggunakan skema *rectenna* untuk proses konversi sinyal RF yang lebih efisien. Skema *rectenna* menggabungkan antena dan *rectifier* secara langsung, sehingga perancangan antenanya harus mempertimbangkan karakteristik dioda yang digunakan [30]. Penggunaan sistem terintegrasi ini akan mempermudah perancangan, tetapi sebagai gantinya akan didapatkan sistem konversi sinyal RF yang memiliki sistem *impedance matching* terintegrasi dan memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan sistem konversi RF yang menggunakan antena dan *rectifier* terpisah.

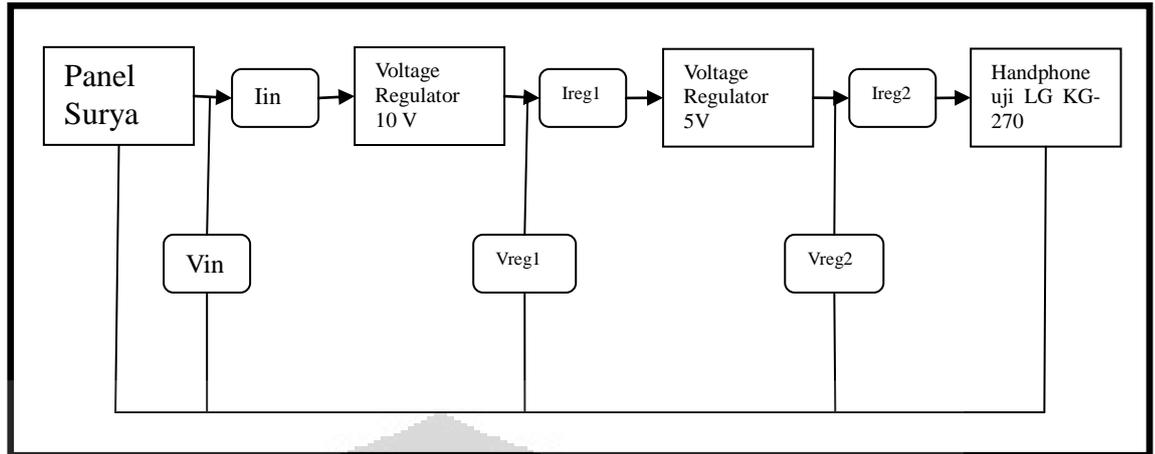
## 5.2. SISTEM DAYA TELEPON SELULER BERBASIS SEL SURYA

### 5.2.1. UJI COBA

Perancangan prototipe sistem charger handphone berbasis panel surya direalisasikan dalam PCB (*Printed Circuit Board*) untuk kemudian diujikan disambungkan langsung dengan handphone uji. Dalam pengujian rancangan, digunakan beberapa alat sebagai berikut:

1. Satu buah modul sel surya STP0055S-12/Db dari SWISSCO SOLAR.
2. Empat buah multimeter digital (dua buah SANWA CD800a, satu buah Heles UX-838TR dan satu buah Krisbow KW06-271) untuk mengukur tegangan dan arus pada sistem *charger*.
3. Rangkaian *voltage regulator*.
4. Kabel penghubung secukupnya.
5. *Handhone* LG KG-270 sebagai beban uji.
6. Satu buah luxmeter untuk mengukur intensitas cahaya matahari.

Uji coba dilakukan di Lapangan Basket EXERCISE Departemen Teknik Elektro. Uji coba sistem *charger* dilakukan dengan langsung menyambungkan rangkaian ke *handphone* uji dan karena sistem akan men-*charger* baterai yang sudah terpasang pada *handphone* maka untuk mengetahui apakah baterai sudah penuh atau belum dimanfaatkan indikator baterai yang bisa dilihat di layar baterai. Rangkaian dan alat ukur disusun seperti ditunjukkan Gambar 5.4, kemudian setiap 15 menit selama 300 menit dilakukan pengukuran intensitas cahaya matahari, arus dan tegangan serta pengecekan kondisi muatan baterai melalui indikator baterai di *handphone*.



Gambar 5.4 Susunan pengujian

Indikator baterai pada layar *handphone* memiliki empat *bar* saat baterai pada kondisi penuh. Uji coba dilakukan dengan memvariasikan kondisi awal baterai untuk melihat pengaruh variasi nilai beban terhadap lamanya waktu *charging*. Uji coba ketiga dilakukan dengan kondisi awal baterai menunjukkan satu *bar* (25 % terisi) dan uji coba keempat dilakukan dengan kondisi awal baterai menunjukkan dua *bar* (50 % terisi). Hasil masing-masing uji coba ditampilkan dalam Tabel 3 dan Tabel 4 pada Lampiran 1. Pembahasan dan analisis hasil uji coba ditampilkan di bagian berikutnya.

## 5.2.2. ANALISIS HASIL UJI COBA

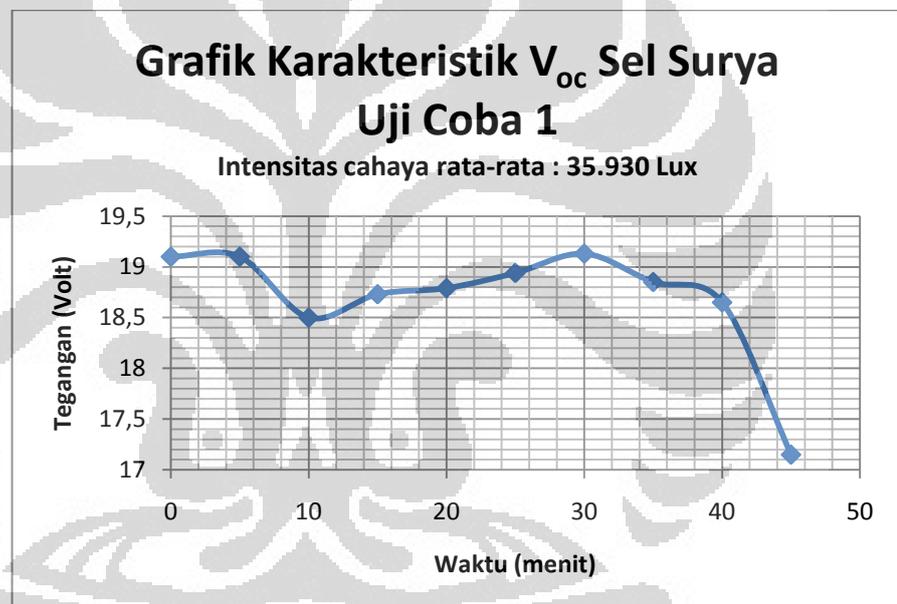
Uji coba yang telah dilakukan menunjukkan bahwa sistem *charger* yang didisain telah mampu memberikan hasil yang diinginkan, yaitu mampu men-*charging* baterai *handphone* hingga penuh. Adapun pengaruh variasi parameter-parameter uji coba dan pengukuran akan dijelaskan di bagian-bagian berikut.

### 5.2.2.1. Analisis Karakteristik Sel Surya

Panel surya yang digunakan adalah STP0055S-12/Db dari SWISSCO SOLAR, dan karakteristiknya telah diberikan di Tabel 3.1. Namun, karakteristik-karakteristik tersebut didapatkan melalui pengujian pada kondisi *Standard Test Condition* (STC) dimana level irradiansi 1000 W/m<sup>2</sup>, spektrum AM 1,5 dan temperatur 25°C. Kondisi pengujian tersebut akan berbeda dengan kondisi uji coba sistem menggunakan sel

surya, karena itu perlu dilakukan lagi uji coba karakteristik sel surya untuk memperkirakan unjuk kerja parameter panel surya saat digunakan.

Dari Tabel 3.1 diketahui bahwa nilai  $V_{oc}$  panel surya pada kondisi STC adalah sebesar 21,4 V. Namun, dari hasil uji coba yang ditampilkan pada Tabel 1 dan 2 di Lampiran 1, didapat nilai  $V_{oc}$  rata-rata panel surya sebesar 18,69 V dengan intensitas cahaya matahari rata-rata selama satu jam sebesar 35.390 Lux dan nilai  $V_{oc}$  rata-rata sebesar 19,36 V didapatkan pada intensitas cahaya matahari rata-rata selama satu jam sebesar 61.910 Lux. Hasil pengukuran selengkapnya dari Tabel 1 ditampilkan dalam grafik hubungan  $V_{oc}$  terhadap waktu pada Gambar 5.5.

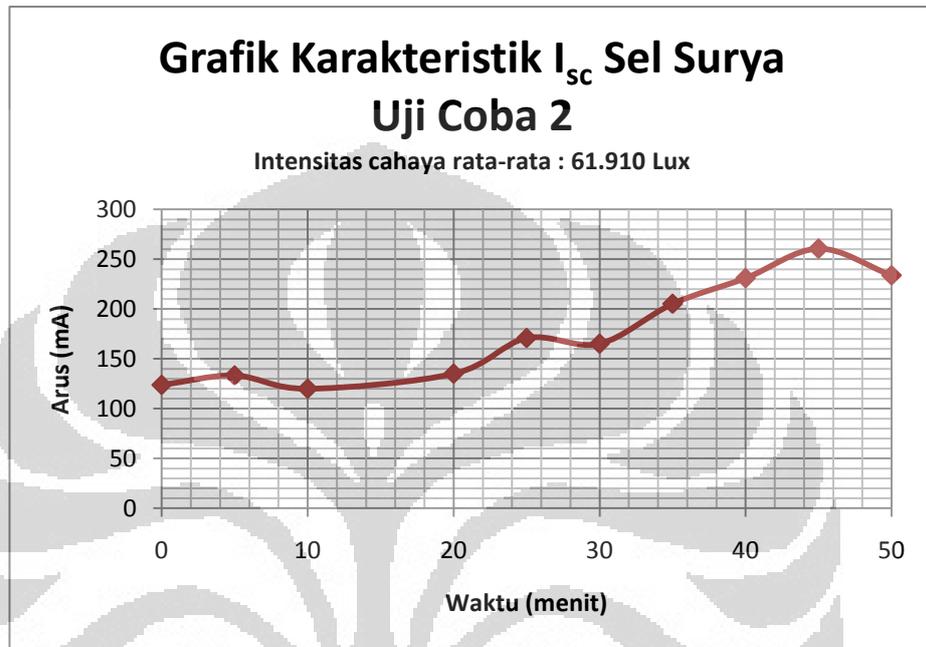


Gambar 5.5 Grafik hubungan  $V_{oc}$  terhadap waktu dari uji coba 1

Dari Tabel 1 pada Lampiran 1 dan Gambar 5.5 diketahui bahwa walaupun nilai  $V_{oc}$  berubah-ubah tergantung intensitas cahaya matahari, namun nilainya tetap cukup besar untuk digunakan langsung pada sistem *charger*. Nilai  $V_{oc}$  dari panel surya perlu diregulasi agar lebih sesuai dengan masukan yang diperlukan sistem *charger*.

Untuk nilai  $I_{sc}$  dari Tabel 3.1 diketahui sebesar 330 mA pada kondisi STC. Namun, dari hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 1 dan 2 di Lampiran 1, didapat nilai  $I_{sc}$  rata-rata panel surya sebesar 125,56mA dengan intensitas cahaya matahari rata-rata selama satu jam

sebesar 35.390 Lux dan nilai  $I_{sc}$  rata-rata sebesar 177,93 mA didapatkan pada intensitas cahaya matahari rata-rata selama satu jam sebesar 61.910 Lux. Hasil pengukuran selengkapnya dari Tabel 2 ditampilkan dalam grafik hubungan  $I_{sc}$  terhadap waktu pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Grafik hubungan  $I_{sc}$  terhadap waktu dari uji coba 2

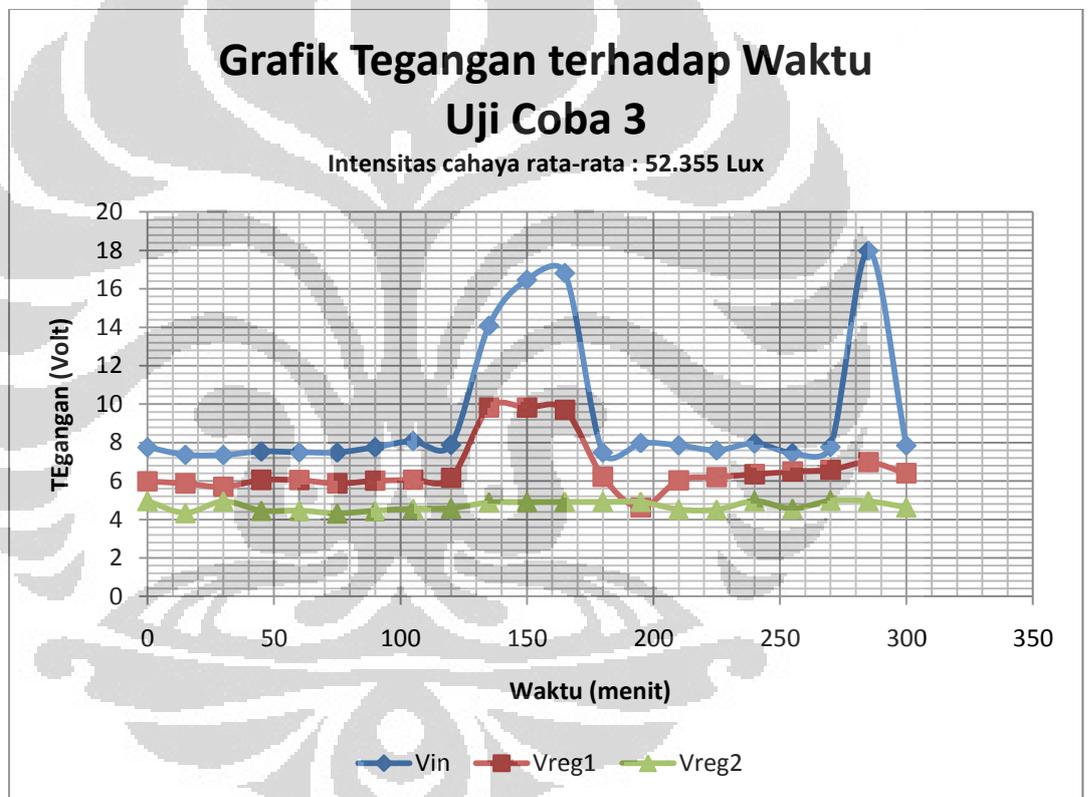
Dari tabel hasil uji coba di Lampiran 1 dan Gambar 4.5 diketahui bahwa nilai  $I_{sc}$  panel surya sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari. Namun, walaupun nilainya berubah-ubah namun karena tidak melebihi batas maksimum nilai arus pada sistem *charger* (700 mA), maka arus panel surya tidak perlu dibatasi.

#### 5.2.2.2. Analisis Unjuk Kerja Voltage Regulator

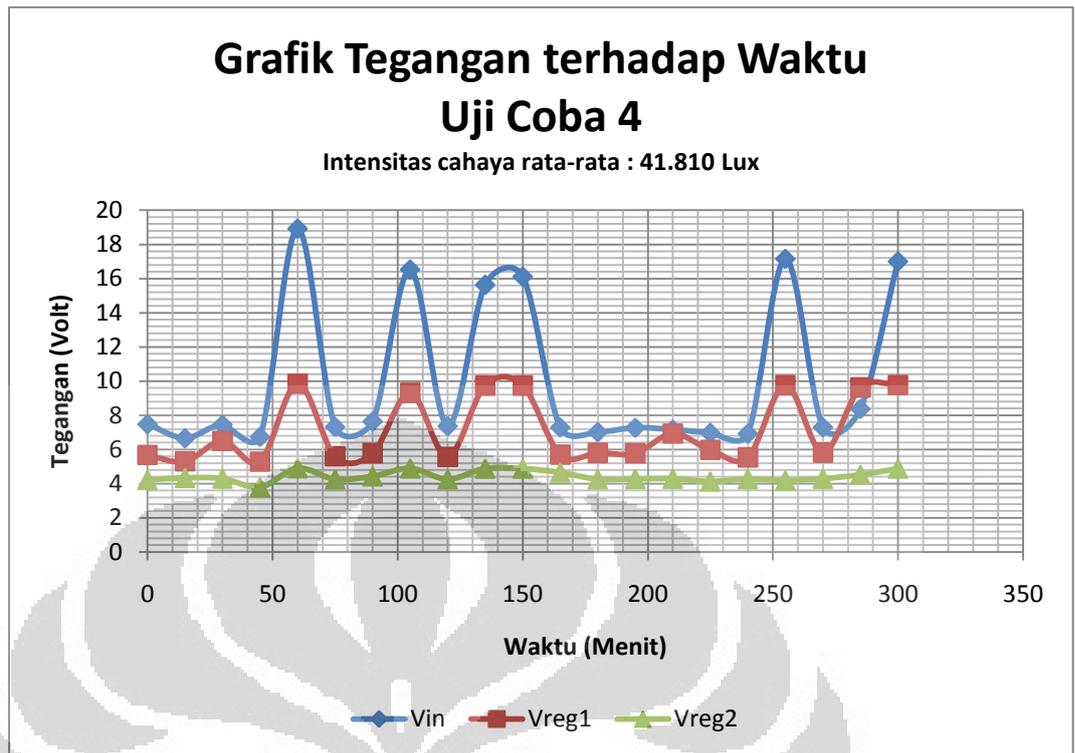
Rangkaian *voltage regulator* dalam sistem ini berfungsi untuk menjaga nilai tegangan yang masuk ke baterai tetap stabil walaupun terjadi variasi nilai *input* akibat perubahan intensitas cahaya matahari. Dalam sistem charging baterai Li-ion, dibutuhkan nilai tegangan yang stabil, sehingga unjuk kerja rangkaian *voltage regulator* menjadi sangat penting. Rangkaian *voltage regulator* pada sistem ini menggunakan IC AN7810 untuk meregulasi variasi nilai tegangan sel surya di nilai 10 V, kemudian hasilnya diregulasi lagi oleh IC AN7805 di nilai 5 V sebelum masuk ke

baterai. Regulasi bertingkat ini bertujuan untuk menjaga suhu kerja sistem supaya tidak cepat panas saat harus *men-charging* dalam waktu yang lama. IC voltage regulator AN78xx yang digunakan bisa bekerja dengan nilai arus masukan minimal sebesar 3,9 mA.

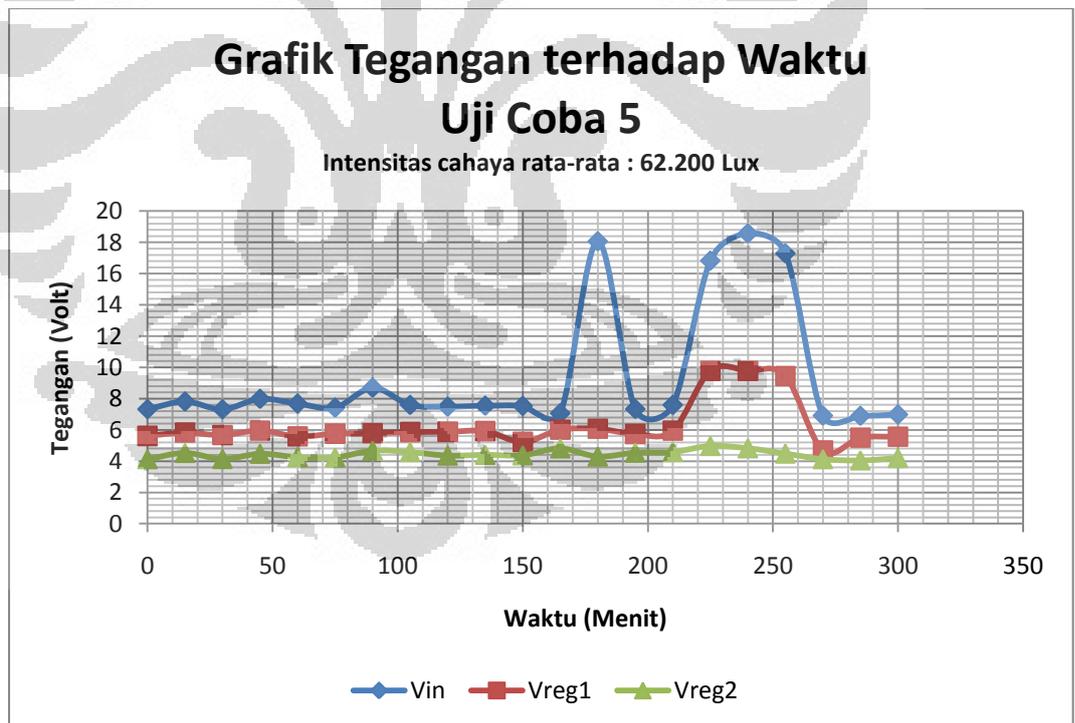
Pengujian rangkaian *voltage regulator* dilakukan dengan mengukur tegangan regulasi dari AN7810 (Vreg1) dan tegangan regulasi dari 7805 (Vreg2). Hasil pengujian tersebut dibandingkan dengan variasi tegangan input dalam grafik pada Gambar 5.7, Gambar 5.8, Gambar 5.9 dan Gambar 5.10.



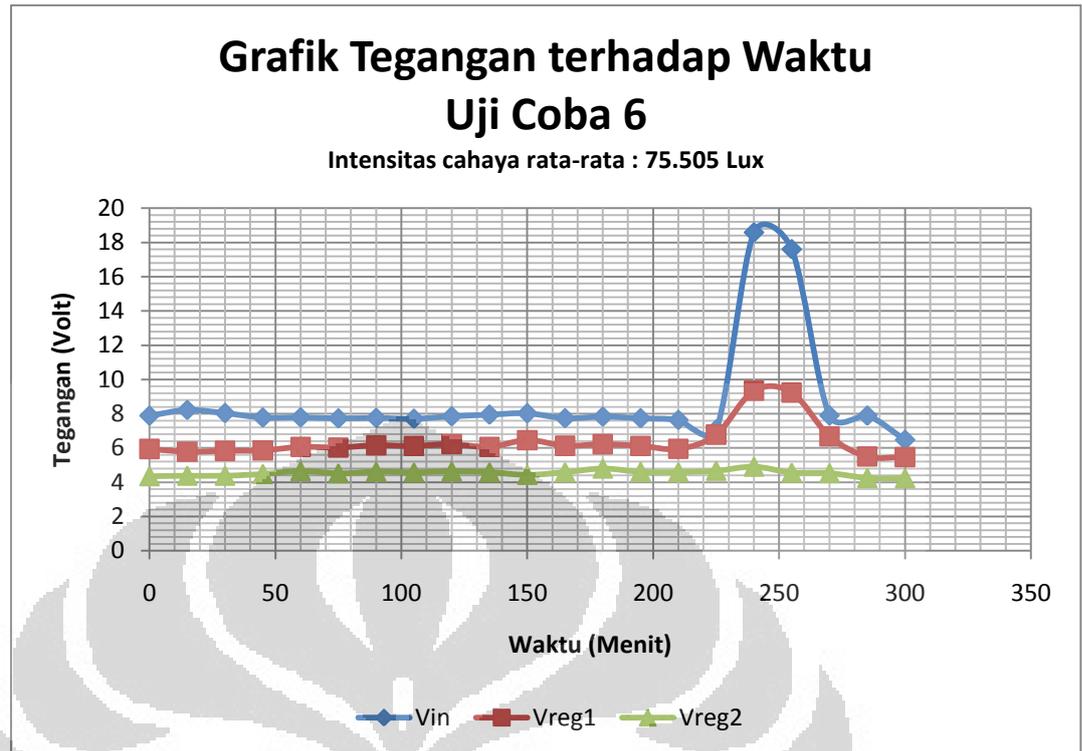
Gambar 5.7 Grafik unjuk kerja *voltage regulator* terhadap waktu dari uji coba 3



Gambar 5.8 Grafik unjuk kerja *voltage regulator* terhadap waktu dari uji coba 4



Gambar 5.9 Grafik unjuk kerja *voltage regulator* terhadap waktu dari uji coba 5



Gambar 5.10 Grafik unjuk kerja *voltage regulator* terhadap waktu dari uji coba 6

Dari grafik pada Gambar 5.7, Gambar 5.8, Gambar 5.9 dan Gambar 5.10 dapat lebih jelas terlihat bahwa tegangan input dari panel surya sangat fluktuatif terhadap waktu karena perubahan intensitas cahaya yang tidak dapat diprediksi. Namun, nilai tegangan yang berubah-ubah dengan drastis ini dapat diregulasi dengan cukup baik oleh regulator 1 (AN7810), walaupun seperti yang terlihat tegangan teregulasi masih mengikuti perubahan nilai tegangan *input*. Hasil yang lebih baik ditunjukkan oleh regulator 2 menggunakan AN7805, dimana tegangan teregulasi jauh lebih stabil terhadap fluktuasi nilai tegangan *input* dan tegangan hasil regulasi AN7810. Nilai keluaran tegangan teregulasi Vreg2 yang stabil ini memenuhi syarat untuk digunakan sebagai tegangan masukan untuk men-*charging* baterai Li-ion.

Seperti yang bisa dilihat di tabel hasil pengujian dan grafik pada Gambar 5.7, Gambar 5.8, Gambar 5.9 dan Gambar 5.10 terdapat perbedaan nilai antara Vreg yang diuji dengan Vreg hasil simulasi. Berdasarkan hasil simulasi, besar tegangan teregulasi saat penggunaan AN7805 adalah sebesar 5 V dan nilai ini konstan terhadap variasi nilai

*input*. Namun, pada hasil pengujian tegangan teregulasi dari AN7805 tidaklah konstan di nilai 5 V melainkan cukup stabil di nilai rata-rata 4,93 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 52.355 Lux, stabil di nilai rata-rata 4,64 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 41.810 Lux, stabil di nilai rata-rata 4,65 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 62.200 Lux dan stabil di nilai rata-rata 4,76 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 75.505 Lux. Pada keempat hasil pengujian terdapat perbedaan dengan hasil simulasi. Namun perbedaan ini tidak begitu berpengaruh pada sistem karena nilainya masih berada di batas atas tegangan *cut-off* baterai Li-ion yang digunakan, yaitu sebesar 3,7 V.

Adapun tegangan teregulasi dari AN7810 seperti yang terlihat pada grafik di Gambar 5.7, Gambar 5.8, Gambar 5.9 dan Gambar 5.10, menunjukkan bahwa hasil regulasinya di saat-saat tertentu cukup dipengaruhi oleh variasi nilai *input*, terutama saat terjadi lonjakan nilai tegangan *input*. Hal ini kemungkinan disebabkan karena selisih antara tegangan *input* dan nilai tegangan regulasi yang cukup besar dan nilai arus yang kecil, sehingga regulator tidak bekerja dengan optimal. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan regulator bertingkat membuat rangkaian regulator lebih tahan terhadap perubahan nilai *input* dan mampu menghasilkan nilai tegangan yang lebih stabil.

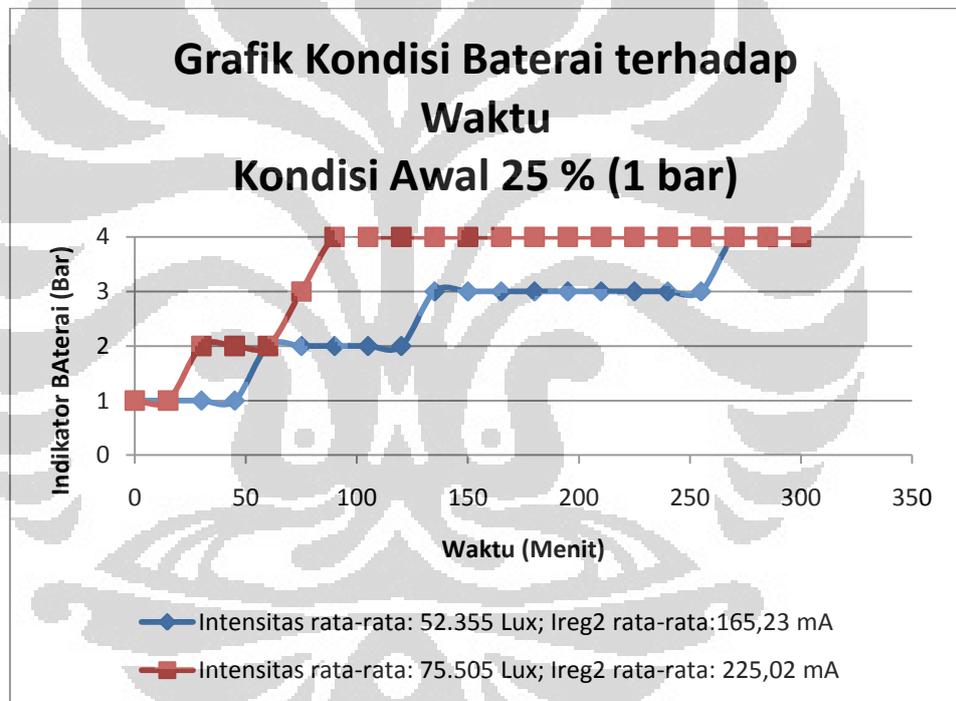
Untuk nilai *input* dapat dilihat bahwa nilainya berbeda dengan  $V_{oc}$  yang telah diukur. Hal ini dikarenakan tegangan *input* merupakan tegangan keluaran panel surya yang diukur setelah disambungkan dengan rangkaian *voltage regulator*, dalam hal ini bertindak sebagai beban bagi panel surya, sehingga mengurangi tegangan *input*. Nilai tegangan regulasi baik dari AN7810 dan AN7805 juga dilihat bahwa keduanya juga lebih kecil dibandingkan nilai seharusnya. Hal ini bisa disebabkan karena pengaruh penambahan beban pada rangkaian, rugi-rugi dari kawat penghubung, alat ukur juga rugi-rugi akibat panas yang muncul pada sistem.

### 5.2.2.3. Analisis Waktu *Charging*

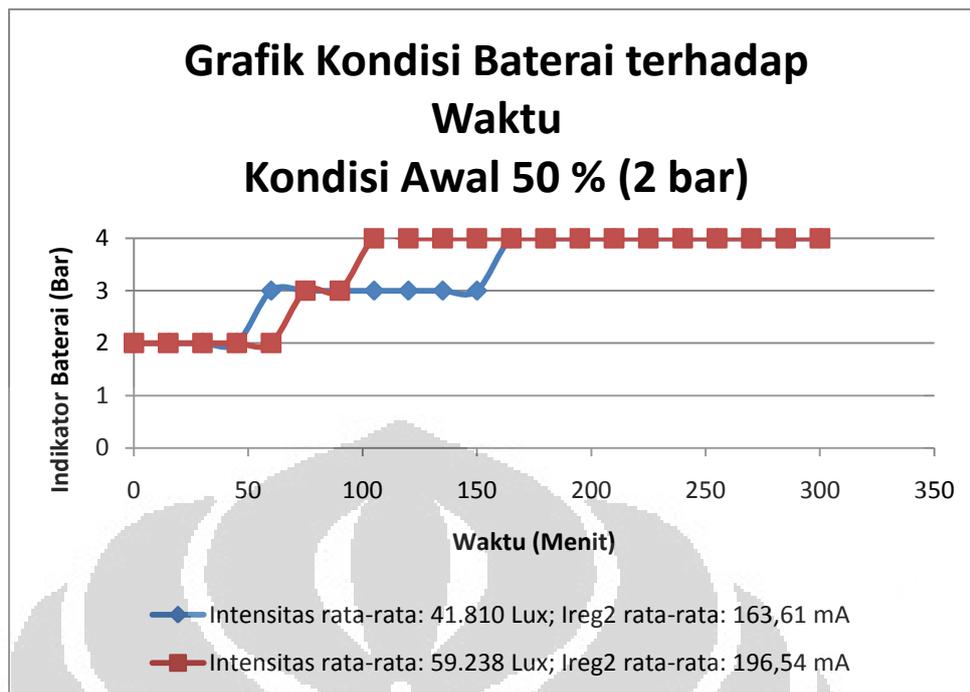
Unjuk kerja sebuah sistem *charging* dilihat dari seberapa cepat

waktu yang dibutuhkan untuk mengisi muatan baterai hingga penuh. Pada sistem *charger* berbasis panel surya ini, waktu yang dibutuhkan untuk men-*charger* baterai sangat dipengaruhi oleh karakteristik keluaran panel surya.

Uji coba sistem *charger* dilakukan dengan dua kondisi awal yang berbeda: uji coba tiga dan enam dilakukan saat baterai *handphone* terisi 25 % (indikator menunjukkan satu bar) dan uji coba empat dan lima saat baterai *handphone* terisi 50 % (indikator menunjukkan). Grafik hubungan waktu terhadap kondisi baterai saat uji coba ditunjukkan oleh Gambar 5.11 dan saat uji coba empat ditunjukkan oleh Gambar 5.12.



Gambar 5.11 Grafik perbandingan waktu *charging* saat kondisi awal baterai terisi 25 %



Gambar 5.12 Grafik perbandingan waktu *charging* saat kondisi awal baterai terisi 50 %

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.11, sistem *charger* membutuhkan waktu total selama 255 menit (4,25 jam) untuk men-*charger* baterai dari kondisi 25 % (1 *bar*) hingga indikator menunjukkan kondisi penuh (4 *bar*) dengan intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 52.355 Lux dan dengan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 165,23 mA dan membutuhkan waktu total selama 75 menit (1,25 jam) saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 75.505 Lux dan dengan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 225,02 mA. Untuk mengisi baterai *handphone* dari kondisi 50 % (2 *bar*) hingga penuh, sistem *charger* membutuhkan waktu 150 menit (2,5 jam) dengan intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 41.810 Lux dan dengan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 163,61 mA dan membutuhkan waktu 90 menit (1,5 jam) saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 59.238 Lux dan dengan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 196,53 mA.

Dari grafik pada Gambar 5.11 dan Gambar 5.12 dapat dilihat bahwa lama waktu *charging* sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang tersedia dan besar arus *charging* yang dihasilkan. Semakin tinggi intensitas cahaya matahari, maka akan semakin besar pula arus

*charging* yang dihasilkan, sehingga waktu *charging* pun akan lebih cepat.

*Charging* baterai Li-ion menggunakan adaptor yang menyertai *handphone* biasanya hanya membutuhkan waktu kurang lebih dua jam untuk men-*charging* baterai dari kondisi kosong hingga penuh. Jika unjuk kerja adaptor komersial dan sistem *charger* ini dibandingkan, waktu yang ditunjukkan selama pengujian memang terbilang lama. Namun, hal ini masih bisa dimaklumi mengingat karakteristik sumber panel surya yang sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari. Bahkan jika sel surya mampu menghasilkan besar arus maksimum sebesar 330 mA, nilai ini masih hanya 52 % dari nilai maksimum arus yang digunakan *charger* komersial, sehingga waktu yang lebih lama memang sudah sewajarnya, meskipun demikian, uji coba yang dilakukan telah mampu membuktikan bahwa sistem *charger* berbasis panel surya mampu men-*charging* baterai *handphone*.

#### 5.2.2.4. Analisis Efisiensi

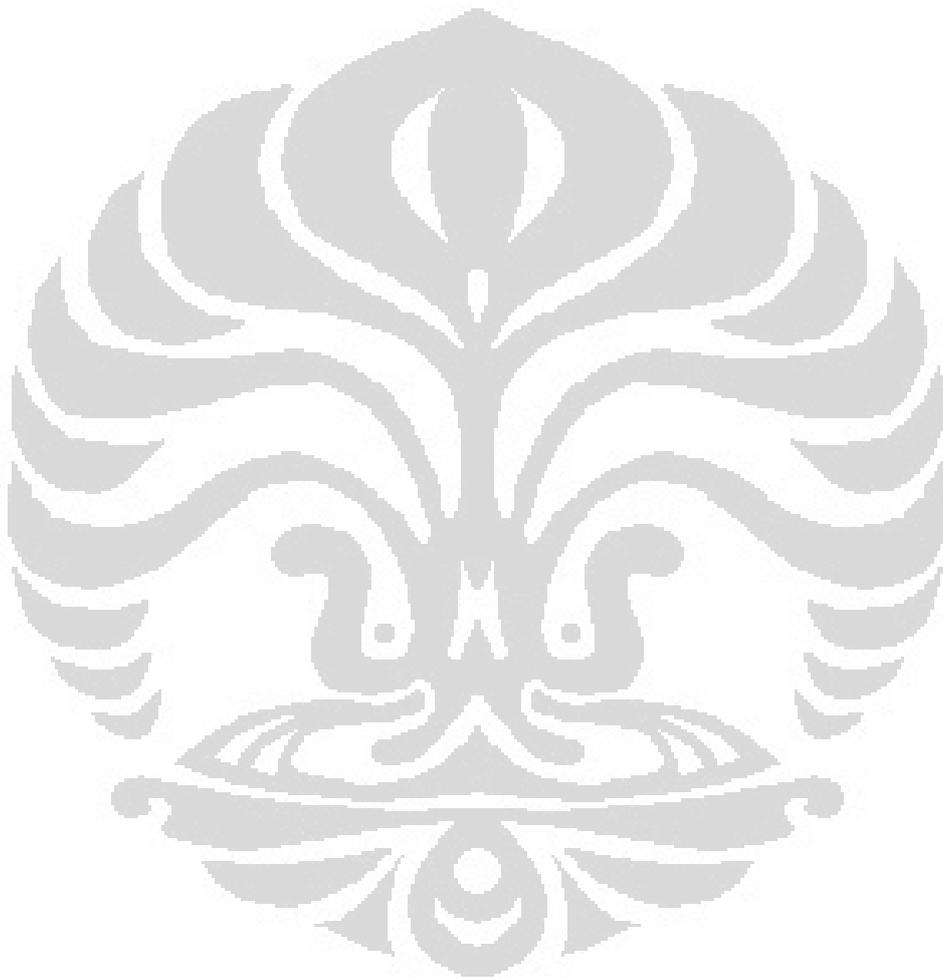
Tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya akan bervariasi tergantung intensitas cahaya matahari yang tersedia, sehingga total daya yang masuk dan keluar pada sistem daya berbasis sel surya juga akan berubah-ubah. Dengan demikian, besar efisiensi sistem daya untuk telepon seluler yang telah dibuat juga akan berubah-ubah tergantung intensitas cahaya matahari yang tersedia. Pada uji coba tiga, efisiensi rata-rata sistem daya untuk telepon seluler berbasis sel surya yang terukur adalah sebesar 45,93%, pada uji coba empat sebesar 51,87, pada uji coba lima sebesar 49,95% dan pada uji coba enam sebesar 45,51%. Sehingga, efisiensi rata-rata sistem daya adalah sebesar 48,32%.

Rugi-rugi daya yang terjadi bisa diakibatkan oleh rugi-rugi akibat hambatan dalam komponen-komponen dan konektor pada rangkaian uji, rugi-rugi akibat hambatan dalam multimeter dan rugi-rugi akibat karakteristik IC voltage regulator. Untuk menambah efisiensi sistem daya berbasis sel surya untuk telepon seluler, dapat digunakan komponen-komponen yang lebih efisien untuk perbaikan di masa yang akan datang.

## BAB VI KESIMPULAN

1. Sistem daya telepon selular berbasis sel surya yang dirancang mampu digunakan untuk men-*charging* baterai *handphone* hingga penuh, namun rancangan sistem daya berbasis RF *energy harvesting* yang direalisasikan belum mampu memberikan hasil yang diinginkan.
2. Sistem daya berbasis RF *energy harvesting* yang dirancang dan dibuat belum mampu menghasilkan nilai tegangan yang bisa digunakan untuk men-*charging* telepon selular, sehingga belum efisien untuk dikombinasikan dengan sistem daya berbasis sel surya, adapun simulasi sistem daya berbasis RF *energy harvesting* menggunakan rangkaian *voltage multiplier 5-stages* dengan Multisim 11.0 mampu mengonversi sinyal RF 900 MHz dengan nilai tegangan *input* AC sebesar 0,5 V menjadi tegangan *output* DC sebesar 2,25 V.
3. Sistem daya berbasis RF *energy harvesting* yang dirancang dan dibuat membutuhkan perbaikan-perbaikan untuk unjuk kerja yang lebih baik di masa depan.
4. Sistem *charger* baterai *handphone* berbasis sel surya dengan regulator dua tingkat menggunakan IC regulator AN7810 dan AN7805 mampu menghasilkan tegangan stabil dengan tegangan rata-rata 4,93 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 52.355 Lux dan stabil di nilai rata-rata 4,64 V saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 41.810 Lux.
5. Sistem *charger* berbasis sel surya membutuhkan waktu total selama 255 menit untuk men-*charger* baterai dari kondisi 25 % (1 *bar*) hingga penuh (4 *bar*) saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 52.355 Lux dan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 165,23 mA; dan membutuhkan waktu 75 menit saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 75.505 Lux dan arus rata-rata sebesar 225,02 mA. Untuk mengisi baterai *handphone* dari kondisi 50 % (2 *bar*) hingga penuh, sistem *charger* membutuhkan waktu 150 menit saat intensitas cahaya matahari rata-rata

sebesar 41.810 Lux dan arus rata-rata yang masuk ke baterai sebesar 163,61 mA dan membutuhkan waktu 90 menit saat intensitas cahaya matahari rata-rata sebesar 62.200 Lux dan arus rata-rata sebesar 206,36 mA.



## DAFTAR ACUAN

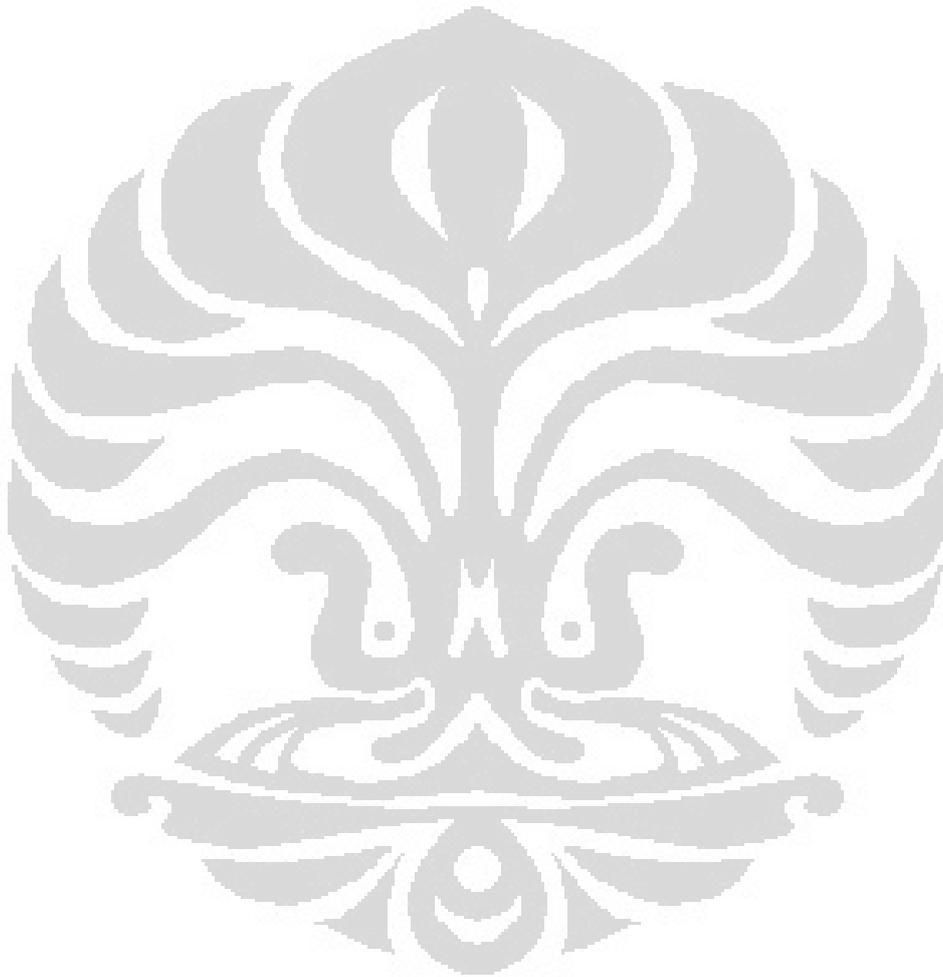
- [1] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," IEEE Pervasive Computing, 4, pp.18–27, 2005
- [2] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach, L.Ventura, "Ambient RF Energy Harvesting", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 2010), 23-25 March, Granada, Spain
- [3] Hamid Jabbar, Young. S. Song, Taikyeong Ted. Jeong, "RF Energy Harvesting System and Circuits for Charging of Mobile Devices", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 1, February 2010, pp. 247-252
- [4] Daniel W. Harrist, "Wireless Battery Charging System Using Radio Frequency Energy Harvesting, dari University of Pittsburgh". A thesis for the degree Master of Science. Faculty of The School of Engineering. University of Pittsburgh. 2004
- [5] Lutfi Albasha, Soudeh Heydari Nasab, Mohammad Asefi, Nasser Qaddoumi, "Investigation of RF Signal Energy Harvesting", Department of Electrical Engineering, American University of Sharjah
- [6] Triet T. Le , "Efficient Power Conversion Interface Circuits for Energy Harvesting Applications". A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Electrical and Computer Engineering. Oregon State University. 2008
- [7] Solar Cell Voltage, Current Characterization.<[www.californiascientific.com/resource/Solar%20Cell.pdf](http://www.californiascientific.com/resource/Solar%20Cell.pdf)>
- [8] Nugroho, M. Rifki (2010, Desember). *Rancangan dan Simulasi Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya*. Seminar Departemen Teknik Elektro
- [9] Green, Martin. A. 1998. "Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications", Prentice Hall, New Jersey
- [10] Shahab, Rianti M (2010,Juli). *Rancang Bangun Prototipe Sistem Pengendali Pengisian Muatan Baterai Dengan Tenaga Surya Sebagai*

*Catu Daya Base Transceiver Station (BTS) GSM* . Tugas Akhir  
Departemen Teknik Elektro

- [11] Balanis, Constantine A. “*Antenna Theory Analysis and Design*”, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. USA. 1997
- [12] Nakar, Punit Shantilal, “*Design of a compact Microstrip Patch Antenna for use in Wireless/Cellular Devices*” . A thesis for Master of Science. Department of Electrical and Computer Engineering. Florida State University. 2004
- [13] Wentworth , Stuart M. “*Fundamentals of Electromagnetic with Engineering Applications*”.
- [14] Ulaby, F.T., “*Fundamentals of Applied Electromagnetics*”, Prentice Hall, 1999
- [15] Saunders, S.R., “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”, John Wiley & Sons, Ltd. 1999
- [16] Hart,Hanner Hart, et al. “*S-Band Radio Frequency Energy Harvesting An Integrated Solution for Low-Powered Embedded Systems*”. Final Design Review. Engineering Programs,University of San Diego.Mei 2009
- [17] Simpson, Chester. *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals*. National Semiconductor.
- [18] Wikipedia. Boost Converter.<  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Boost\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter)>
- [19] Charging Lithium-ion. Battery University.  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)
- [20] KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL POS DAN TELEKOMUNIKASI NOMOR : 23 / DIRJEN / 2004. TENTANG PERSYARATAN TEKNIS ALAT DAN PERANGKAT JARINGAN GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE (GSM) 900 MHz / DIGITAL COMMUNICATION SYSTEM (DCS) 1800 MHz
- [21] Dipole Antenna.< [http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna)>
- [22] T. Sogorb, J.V. Llario, J. Pelegri, R. Lajara, J. Alberola, “*Studying the Feasibility of Energy Harvesting from Broadcast RF Station for WSN*”, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology

- Conference (IIMTC 2008), 12-15 May, Victoria, Vancouver Island, Canada
- [23] Pylarinos, L. (2006, May 25). “*Charge Pumps: An Overview*”. University of Toronto, Canada. Retrieved from University of Toronto.
- [24] Texas Instruments. Low Input Voltage Step-up Converter In Pin SC-70 Package. Januari 2009. [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [25] Panasonic. Voltage Regulator AN78xx/AN78xxF Series. <[www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com)>
- [26] <<http://www.souq.com/LG-KG270-Mobile-Phone-with-FM-Radio/6931572-EN/>>
- [27] Mahima Arrawatia, Maryam Shojaei Baghini, Girish Kumar, “*RF Energy Harvesting System from Cell Towers in 900MHz Band*”. Electrical Engineering Department, Indian Institute of Technology Bombay.
- [28] Hewlett Packard. Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes Technical Data HSMS-28XX Series. [www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com)
- [29] <<http://octopart.com/hsms-2820-tr1g-avago-658793>>
- [30] Joseph A. Hagerty, Florian B. Helmbrecht, William H. McCalpin, Regan Zane, and Zoya B. Popovic. “*Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays*”. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 3, MARCH 2004
- [31] J. Heikkinen et al., “Planar Rectennas for 2.45 GHz Wireless Power Transfer.” In *Proceedings of Radio and Wireless Conference 2000 (RAWCON)*, Denver, Colorado, USA, September 2000, pp 63-66.
- [32] M. Mi et al. “RF Energy Harvesting with Multiple Antennas in the Same Space,” *Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 5, pp. 100-106, Oct. 2005.
- [33] T. Salter et al. “RF Energy Scavenging System Utilising Switched Capacitor DC-DC Converter”. ELECTRONICS LETTERS 26th March 2009 Vol. 45 No. 7

- [34] An Integration Scheme for RF Power Harvesting H. Yan, *Student Member, IEEE*, J. G. Macias Montero, A. Akhnouk, L. C. N. de Vreede, *Senior Member, IEEE*, and J.N. Burghartz, *Fellow, IEEE*
- [35] Richard K. Williams and Robert Blattner, “Pseudo-Schottky diode”, U.S.Patent 6,476,442, Nov. 5, 2002



## DAFTAR PUSTAKA

- Balanis, Constatine A. “*Antenna Theory Analysis and Design*”, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. USA. 1997
- Boylestad, Robert L., Nashelsky, Louis, “*Electronic Devices and Circuit Theory*”, 9th Edition, Pearson Prentice Hall. 2006
- Daniel W. Harrist, “*Wireless Battery Charging System Using Radio Frequency Energy Harvesting*”. A thesis for the degree Master of Science. Faculty of The School of Engineering. University of Pittsburgh. 2004
- Makarov, S.N., “*Antenna and EM Modeling with MATLAB*”, John Wiley & Sons, Inc. 2002
- Nakar, Punit Shantilal, “*Design of a compact Microstrip Patch Antenna for use in Wireless/Cellular Devices*” . A thesis for Master of Science. Department of Electrical and Computer Engineering. Florida State University. 2004
- Saunders, S.R., “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”, John Wiley & Sons, Ltd. 1999
- Triet T. Le , “*Efficient Power Conversion Interface Circuits for Energy Harvesting Applications*”. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Electrical and Computer Engineering. Oregon State University. 2008
- Ulaby, F.T., “*Fundamentals of Applied Electromagnetics*”, Prentice Hall, 1999
- Wentworth , Stuart M. “*Fundamentals of Electromagnetic with Engineering Applications*”, John Wiley & Sons Inc. USA. 2006

# LAMPIRAN 1

## PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA I

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik  
Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Rabu / 1 Juni 2011

Waktu : 14.16 – 15.00

Keadaan : Uji karakteristik panel surya

Periode pengukuran : 5 menit

Keterangan :

$V_{oc}$  = tegangan panel sel surya (V)

$I_{sc}$  = arus panel sel surya (mA)

Lumen = Intensitas cahaya (Lux)

Tabel 1. Data Pengukuran Uji Coba I

Jam	Lumen	Sel Surya	
		$V_{oc}$	$I_{sc}$
14.16	58.200	19,1	176
14.21	51.000	19,1	176,1
14.26	35.000	18,5	136,8
14.31	41.000	18,73	138
14.36	31.000	18,79	115
14.41	37.200	18,94	125
14.46	33.000	19,13	131
14.51	31.300	18,85	113,3
14.56	31.800	18,65	113,2
15.01	9.800	17,15	31,16

## PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA II

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik  
Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Kamis / 2 Juni 2011

Waktu : 12.10 – 12.55

Keadaan : Uji karakteristik panel surya

Periode pengukuran : 5 menit

Keterangan :

$V_{oc}$  = tegangan panel sel surya (V)

$I_{sc}$  = arus panel sel surya (mA)

Lumen = Intensitas cahaya (Lux)

Tabel 2. Data Pengukuran Uji Coba II

Jam	Lumen/Lux	Sel Surya	
		$V_{oc}$	$I_{sc}$
12.10	42.300	19,80	123,8
12.15	45.000	19,55	133,3
12.20	42.300	19,27	120
12.25	48.200	19,23	135,1
12.30	60.200	19,23	170,9
12.35	57.900	19,14	165,2
12.40	73.200	19,18	205,3
12.45	83.400	19,56	231,1
12.50	90.700	19,34	260,7
12.55	75.900	19,36	233,9

### PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA III

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik  
Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Rabu / 8 Juni 2011

Waktu : 10.30 – 15.15

Keadaan : Sistem dengan beban (handphone) / pengisian baterai

Keadaan awal : Indikator baterai di handphone menunjukkan satu bar  
(keadaan penuh 4 bar)

Perioda pengukuran : 15 menit

Keterangan :

$V_{in}$  = tegangan panel sel surya  
 $I_{in}$  = arus panel sel surya  
 $V_{reg1}$  = tegangan regulator 10 V  
 $I_{reg1}$  = arus regulator 10 V  
 $V_{reg2}$  = tegangan regulator 5 V  
 $I_{reg2}$  = arus regulator 5 V  
Lumen = Intesitas cahaya (Lux)

Tabel 3. Data Pengukuran Uji Coba III

Jam	Lumen (Lux)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{reg1}$ (V)	$I_{reg1}$ (mA)	$V_{reg2}$ (V)	$I_{reg2}$ (mA)	Indikator Baterai	Efisiensi (%)
10.30	62.000	7,76	223,6	5,99	221,9	4,96	223,5	1 bar	36,11
10.45	72.000	7,37	242,6	5,88	243,6	4,34	245,2	1 bar	40,48
11.00	55.000	7,36	176,9	5,70	151,6	4,95	168,4	1 bar	35,97
11.15	83.400	7,54	267,8	6,06	269	4,46	271,5	1 bar	40,03
11.30	88.700	7,50	280,1	6,05	282,3	4,46	285,8	2 bar	39,32
11.45	78.600	7,49	248,3	5,88	251,4	4,32	238,1	2 bar	44,69
12/00	78.600	7,76	260,1	6,02	264,5	4,45	271,9	2 bar	40,05
12.15	80.900	8,08	263,9	6,07	271,8	4,56	272,3	2 bar	41,76
12.30	88.500	7,89	259,1	6,17	256,3	4,59	263,5	2 bar	40,83
12.45	84.800	14,08	263,4	9,82	265,7	4,89	270,4	3 bar	64,34

<b>Jam</b>	<b>Lumen (Lux)</b>	<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>I<sub>in</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg1</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg1</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg2</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg2</sub> (mA)</b>	<b>Indikator Baterai</b>	<b>Efisiensi (%)</b>
13.00	76.900	16,47	243,6	9,82	256,3	4,91	256,2	3 bar	68,64
13.15	85.500	16,82	220,9	9,71	219,1	4,92	210,4	3 bar	72,13
13.30	7.500	7,49	65,6	6,23	89,7	4,92	72,4	3 bar	27,50
13.45	12.600	7,98	130,4	4,63	140,8	4,92	139,5	3 bar	34,04
14.00	9.100	7,86	74,3	6,04	72,9	4,52	73,7	3 bar	42,95
14.15	9.000	7,60	30	6,2	33,5	4,51	35,6	3 bar	29,58
14.30	9.700	7,96	31,6	6,36	34,3	4,96	33,6	3 bar	33,74
14.45	8.700	7,46	30,1	69,5	34,3	4,56	32,9	3 bar	33,18
15.00	10.200	7,78	48,3	6,59	47,6	4,98	47,3	4 bar	37,31
15.15	27.200	17,98	112,1	6,98	108,3	4,96	110	4 bar	72,93
15.30	18.200	7,86	56,1	6,41	54,7	4,63	53,9	4 bar	43,40

## PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA IV

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik  
Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Kamis / 9 Juni 2011

Waktu : 10.00 – 15.00

Keadaan : Sistem dengan beban (handphone) / pengisian baterai

Keadaan awal : Indikator baterai di handphone menunjukkan dua bar  
(keadaan penuh 4 bar)

Perioda pengukuran : 15 menit

Keterangan :

$V_{in}$  = tegangan panel sel surya (V)

$I_{in}$  = arus panel sel surya (mA)

$V_{reg1}$  = tegangan regulator 10 V (V)

$I_{reg1}$  = arus regulator 10 V (mA)

$V_{reg2}$  = tegangan regulator 5 V (V)

$I_{reg2}$  = arus regulator 5 V (mA)

Lumen = Intensitas cahaya (Lux)

Tabel 4. Data Pengukuran Uji Coba IV

Jam	Lumen (Lux)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{reg1}$ (V)	$I_{reg1}$ (mA)	$V_{reg2}$ (V)	$I_{reg2}$ (mA)	Indikator Baterai	Efisiensi (%)
10.00	62.400	7,48	210,0	5,68	212,3	4,22	210,9	2 bar	43,34
10.15	16.500	6,66	40,5	5,30	243,6	4,34	245,2	2 bar	33,56
10.40	59.900	7,45	210,4	6,5	211,6	4,3	223,1	2 bar	38,79
10.45	20.800	6,74	78,4	5,29	26,4	3,8	78,5	2 bar	43,54
11.00	81.100	18,92	268,3	9,85	269,8	4,9	260,3	3 bar	74,87
11.15	73.200	7,32	231,6	5,6	232,4	4,26	236,3	3 bar	40,62
11.30	59.200	7,64	209,4	5,78	210,3	4,43	209,3	3 bar	42,04
11.45	23.600	16,53	94,3	9,31	100,1	4,89	91,8	3 bar	71,20
12.00	61.400	7,37	210,0	5,56	231,8	4,26	223,4	3 bar	38,50
12.15	17.900	15,63	110,3	9,74	100,3	4,88	89,3	3 bar	74,72

<b>Jam</b>	<b>Lumen (Lux)</b>	<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>I<sub>in</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg1</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg1</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg2</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg2</sub> (mA)</b>	<b>Indikator Baterai</b>	<b>Efisiensi (%)</b>
12.30	18.600	16,12	70,8	9,74	70,1	4,88	69,8	3 bar	70,15
12.45	59.000	7,29	200,9	5,69	200,1	4,65	190,6	4 bar	39,48
13.00	60.200	7,02	200,9	5,80	200	4,26	201,3	4 bar	39,19
13.15	54.100	7,27	183,6	5,78	182,8	4,28	184,3	4 bar	40,90
13.30	47.900	7,16	176,4	6,93	176,3	4,29	174,3	4 bar	40,79
13.45	14.700	6,98	60,0	5,98	60,0	4,13	70,9	4 bar	30,08
14.00	10.900	6,93	51,3	5,54	50,6	4,27	50,8	4 bar	38,98
14.15	17.000	17,15	112,7	9,76	111,2	4,19	112,3	4 bar	75,65
14.30	33.000	7,30	141,6	5,82	140,7	4,29	140,3	4 bar	41,77
14.45	26.800	8,37	130,6	9,63	128,6	4,52	127,9	4 bar	47,11
15.00	18.000	17,00	83,9	9,77	82,3	4,88	81,6	4 bar	72,08

## PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA V

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Kamis / 16 Juni 2011

Waktu : 10.30 – 15.15

Keadaan : Sistem dengan beban (handphone) / pengisian baterai

Keadaan awal : Indikator baterai di handphone menunjukkan dua bar (keadaan penuh 4 bar)

Periode pengukuran : 15 menit

Keterangan :

$V_{in}$  = tegangan panel sel surya       $I_{in}$  = arus panel sel surya

$V_{reg1}$  = tegangan regulator 10 V       $I_{reg1}$  = arus regulator 10 V

$V_{reg2}$  = tegangan regulator 5 V       $I_{reg2}$  = arus regulator 5 V

Lumen = Intesitas cahaya (Lux)

Tabel 5. Data Pengukuran Uji Coba V

Jam	Lumen (Lux)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{reg1}$ (V)	$I_{reg1}$ (mA)	$V_{reg2}$ (V)	$I_{reg2}$ (mA)	Indikator Baterai	Efisiensi (%)
10.30	62.700	7,32	200,6	5,62	201,8	4,13	200,2	2 bar	43,69
10.45	61.200	7,81	180,6	5,83	181,3	4,53	178,3	2 bar	42,73
11.00	63.000	7,31	220,4	5,67	199,8	4,14	220,1	2 bar	43,44
11.15	62.800	7,98	223,5	5,96	221,6	4,48	223,2	2 bar	43,93
11.30	68.600	7,68	234,0	5,58	229,9	4,26	231,6	2 bar	45,10
11.45	73.400	7,42	236,9	5,76	236,3	4,24	236,2	3 bar	43,02
12.00	83.000	8,70	241,6	5,79	242,3	4,68	242,9	3 bar	45,91
12.15	80.100	7,59	242,6	5,86	242,1	4,59	242,6	4 bar	39,52
12.30	76.400	7,48	237,0	5,88	236,8	4,36	238,1	4 bar	41,44
12.45	76.100	7,54	234,6	5,92	231,9	4,41	233,2	4 bar	41,86
13.00	69.600	7,53	228,8	5,23	231,5	4,38	229,1	4 bar	41,75
13.15	75.600	7,06	220,0	6,01	220,0	4,82	221,0	4 bar	31,41

<b>Jam</b>	<b>Lumen (Lux)</b>	<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>I<sub>in</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg1</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg1</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg2</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg2</sub> (mA)</b>	<b>Indikator Baterai</b>	<b>Efisiensi (%)</b>
13.30	64.700	18,07	210,0	6,07	212,3	4,30	214,6	4 bar	75,68
13.45	58.000	7,33	183,0	5,74	182,9	4,55	183,5	4 bar	37,76
14.00	52.000	7,59	180,1	5,95	180,8	4,59	181,3	4 bar	39,12
14.15	38.000	16,83	109,9	9,78	110,5	4,98	110,6	4 bar	70,22
14.30	27.000	18,58	110,8	9,78	109,9	4,83	109,9	4 bar	74,21
14.45	40.200	17,30	112,6	9,45	113,0	4,49	113,4	4 bar	73,86
15.00	6.400	6,91	24,6	4,68	23,8	4,13	24,3	4 bar	40,37
15.15	5.200	6,89	20,1	5,50	19,8	4,05	19,8	4 bar	43,29
15.30	10.000	6,98	38,4	5,57	39,1	4,20	33,4	4 bar	41,34



## PENGOLAHAN DATA PENGUKURAN UJI COBA VI

Tempat : Lapangan Kontainer EXERCISE, Departemen Teknik  
Elektro Universitas Indonesia

Hari/tanggal : Sabtu / 18 Juni 2011

Waktu : 10.30 – 15.15

Keadaan : Sistem dengan beban (handphone) / pengisian baterai

Keadaan awal : Indikator baterai di handphone menunjukkan satu bar  
(keadaan penuh 4 bar) dalam kondisi stand-by

Perioda pengukuran : 15 menit

Keterangan :

$V_{in}$  = tegangan panel sel surya       $I_{in}$  = arus panel sel surya  
 $V_{reg1}$  = tegangan regulator 10 V       $I_{reg1}$  = arus regulator 10 V  
 $V_{reg2}$  = tegangan regulator 5 V       $I_{reg2}$  = arus regulator 5 V  
 Lumen = Intesitas cahaya (Lux)

Tabel 6. Data Pengukuran Uji Coba VI

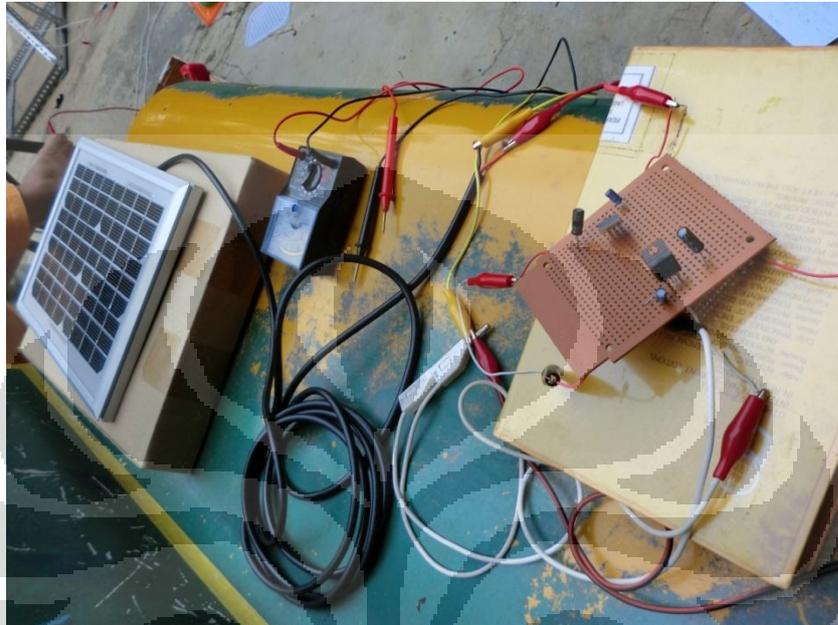
Jam	Lumen (Lux)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{reg1}$ (V)	$I_{reg1}$ (mA)	$V_{reg2}$ (V)	$I_{reg2}$ (mA)	Indikator Baterai	Efisiensi (%)
10.30	83.000	7,89	251,6	5,94	261,9	4,35	271,3	1 bar	40,55
10.45	85.500	8,22	261,9	5,78	260,1	4,38	279,3	1 bar	43,17
11.00	89.000	8,04	259,3	5,83	260,3	4,38	274,3	2 bar	42,37
11.15	89.700	7,78	260,9	5,86	263,1	4,48	275,8	2 bar	39,12
11.30	92.000	7,79	265,3	6,06	273,3	4,66	274,9	2 bar	38,01
11.45	92.400	7,73	283,1	6,03	280,9	4,52	284,1	3 bar	41,31
12.00	91.900	7,76	273,4	6,16	273,0	4,62	272,9	4 bar	40,51
12.15	84.000	7,71	260,0	6,12	263,4	4,58	265,1	4 bar	39,43
12.30	92.300	7,85	258,5	6,23	257,3	4,64	265,7	4 bar	39,24
12.45	89.600	7,95	253,6	6,06	260,0	4,59	263,1	4 bar	40,10
13.00	84.100	8,03	230,6	6,46	234,6	4,43	232,9	4 bar	44,28
13.15	88.200	7,74	240,0	6,13	289,3	4,59	240,6	4 bar	40,54
13.30	78.000	7,83	233,0	6,22	233,1	4,80	230,6	4 bar	39,32

<b>Jam</b>	<b>Lumen (Lux)</b>	<b>V<sub>in</sub> (V)</b>	<b>I<sub>in</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg1</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg1</sub> (mA)</b>	<b>V<sub>reg2</sub> (V)</b>	<b>I<sub>reg2</sub> (mA)</b>	<b>Indikator Baterai</b>	<b>Efisiensi (%)</b>
13.45	77.600	7,74	228,1	6,12	219,5	4,61	220,0	4 bar	42,55
14.00	72.000	7,64	219,1	5,95	218,8	4,59	219,3	4 bar	39,86
14.15	65.400	7,08	198,9	6,78	199,5	4,67	198,6	4 bar	34,13
14.30	43.000	18,58	112,8	9,34	112,9	4,91	111,9	4 bar	73,78
14.45	40.000	17,60	109,9	9,23	109,0	4,56	109,4	4 bar	74,20
15.00	32.600	7,90	99,6	6,68	99,9	4,53	100,3	4 bar	42,25
15.15	19.800	7,89	45,1	5,50	46,8	4,25	47,8	4 bar	42,90
15.30	20.000	6,48	60,4	5,47	61,1	4,23	62,4	4 bar	32,56



## LAMPIRAN 2

### Uji coba sistem charger berbasis panel surya (1)



### Uji coba sistem charger berbasis panel surya (2)



**Uji coba sistem charger berbasis RF *energy harvesting* (1)**



**Uji coba sistem charger berbasis RF *energy harvesting* (2)**



**Uji coba sistem charger berbasis RF *energy harvesting* (3)**

