



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN MODUL PENYUPLAI DAYA DENGAN  
MEMANFAATKAN ENERGI MATAHARI  
UNTUK *WIRELESS SENSOR NODE***

**SKRIPSI**

**Bayu Bumida Stani**

**0706163615**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**Juni 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN MODUL PENYUPLAI DAYA DENGAN  
MEMANFAATKAN ENERGI MATAHARI \UNTUK  
*WIRELESS SENSOR NODE***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**Bayu Bumida Stani**

**0706163615**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**Juni 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 : Bayu Bumida Stani

NPM : 0706163615

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Bayu Bumida Stani  
NPM : 0706163615  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Modul Penyuplai Daya Dengan  
Memanfaatkan Energi Matahari Untuk  
*Wireless Sensor Node*

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

### DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Dr. Abdul Halim M.Eng

Penguji : Dr. Abdul Muis S.T. M.Eng

()  
()  
()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati M.T, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 6 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

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

Nama : Bayu Bumida Stani  
NPM : 0706163615  
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 skripsi saya yang berjudul :

**Rancang Bangun Modul Penyuplai Daya Dengan Memanfaatkan Energi  
Matahari Untuk *Wireless Sensor Node***

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir 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 : 6 Juni 2011

Yang menyatakan



(Bayu Bumida Stani)

## ABSTRAK

Nama : Bayu Bumida Stani  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Rancang Bangun Modul Penyuplai Daya Dengan  
Memanfaatkan Energi Matahari Untuk *Wireless Sensor Node*

Usia baterai yang terbatas dari *embedded system* dan *mobile devices* mengakibatkan baterai itu harus sering di *recharge* atau solusi yang lain adalah dengan mengganti baterai tersebut. Salah satu solusi untuk membuat *embedded system* dan *personal device* dapat beroperasi terus-menerus, yaitu dengan memanfaatkan energi matahari dan sistem fotovoltaik. Skripsi ini bertujuan untuk merancang bangun modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari sebagai pengganti baterai untuk *modern embedded system* dan aplikasi-aplikasi daya rendah. Salah satu contoh dari *embedded system* daya rendah adalah *sensor node IEEE 802.15.4/Zigbee* yang digunakan pada WSN. *Embedded system* ini berbasis pada *Freescale System-in-Package MC13213* dan sudah termasuk RF *transceiver* untuk aplikasi-aplikasi ZigBee. Daya yang dibutuhkan oleh alat ini adalah  $< 1\text{mW}$  untuk keadaan *stand-by* dan mencapai sekitar  $50\text{mW}$  untuk keadaan aktif. Modul penyuplai daya ini dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *power supply*, rangkaian *input (maximum power point tracker)*, dan rangkaian *output*. Modul ini ditargetkan untuk menyuplai *embedded system* daya rendah khususnya *wireless sensor node* dengan tegangan kerja 3,3 volt dan konsumsi daya sampai dengan 50 miliwatt.

Kata kunci: sel surya, *embedded system*, *sensor node*

## ABSTRACT

Name : Bayu Bumida Stani  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Design of Power Supply Module for Wireless Sensor Node Based on Solar Energy

The limited battery lifetime of modern embedded systems and mobile devices necessitates frequent battery recharging or replacement. One of the solution to make embedded systems and personal devices operate continuously is utilizing the solar energy and photovoltaic system. This final project aims to design a power supply module by utilizing solar energy as a replacement of battery for modern embedded system and low power application. The example of low power embedded system is IEEE 802.15.4/ZigBee sensor node used in Wireless Sensor Network (WSN). This embedded system is based on Freescale System-in-Package MC13213 including an IEEE 802.15.4 RF transceiver for ZigBee applications. The power consumption of the wireless device provided by the manufacturer with sensors and microcontroller in standby condition is  $< 1\text{wW}$ , while the power consumption reaches approximately  $50\text{mW}$  when microcontroller and sensors are active. This power supply module can be divided into three parts, power supply circuit, input circuit (maximum power point tracker), and the output circuit. This module is targeted to supply low power embedded systems, especially wireless sensor node with the operating voltage of 3.3 volt and the power consumption up to  $50\text{ mW}$ .

keyword: solar cell, embedded system, sensor node



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
1. BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penulisan .....	3
1.4 Metode Penelitian .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
2. BAB 2 DASAR TEORI .....	4
2.1 Sel Surya .....	4
2.2 Parameter Dasar Sel Surya .....	5
2.3 <i>Maximum Power Point Tracker</i> .....	10
2.4 Metode MPPT .....	15
2.5 Komparator Tegangan .....	17
2.6 Superkapasitor .....	21
3. BAB 3 DISAIN RANGKAIAN MODUL PENYUPLAI DAYA DENGAN MEMANFAATKAN ENERGI MATAHARI UNTUK <i>WIRELESS SENSOR NODE</i> .....	24
3.1 Rangkaian <i>Input</i> .....	24
3.2 Rangkaian <i>Output</i> .....	26
3.3 Rangkaian Modul Penyuplai Daya Dengan Memanfaatkan Energi Matahari .....	27
4. BAB 4 UJI COBA DAN ANALISIS .....	30
4.1 Simulasi .....	30
4.2 Uji Coba .....	32
5. KESIMPULAN .....	46

DAFTAR ACUAN .....	47
DAFTAR PUSTAKA .....	49
LAMPIRAN	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva karakteristik untuk menentukan daya maksimum.....	7
Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen sel surya .....	9
Gambar 2.3 Pengaruh temperatur terhadap kurva karakteristik .....	10
Gambar 2.4 Diagram skematik konverter DC-DC .....	11
Gambar 2.5 Diagram blok sistem fotovoltaik dengan konverter DC-DC..	12
Gambar 2.6 Rangkaian dasar konverter buck .....	12
Gambar 2.7 Rangkaian dasar konverter boost.....	15
Gambar 2.8 a) Bentuk dasar .....	17
Gambar 2.8 b) Aplikasi pada umumnya .....	17
Gambar 2.9 a) Op-amp sebagai komparator .....	18
Gambar 2.9 b) Karakteristik <i>output</i> .....	18
Gambar 2.10 a) Komparator deteksi tingkat nol .....	19
Gambar 2.10 b) Grafik tegangan <i>input</i> dan <i>output</i> .....	19
Gambar 2.11 a) Referensi komparator dengan pembagi tegangan.....	19
Gambar 2.11 b) Referensi komparator dengan zener .....	19
Gambar 2.12 a) Sinyal <i>input</i> ac .....	20
Gambar 2.12 b) Sinyal <i>output</i> .....	20
Gambar 2.13 Komparator dengan beberapa spesifikasi khusus .....	20
Gambar 2.14 Superkapasitor .....	21
Gambar 2.15 Grafik Ragone menunjukkan rapat energi vs rapat daya .....	22
Gambar 3.1 Blok diagram rangkaian modul penyuplai daya.....	24
Gambar 3.2 Rangkaian <i>input</i> dengan MPPT .....	25
Gambar 3.3 Rangkaian <i>output</i> .....	27
Gambar 3.4 Rangkaian modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari .....	29
Gambar 4.1a Rangkaian ganti sel surya utama .....	30

Gambar 4.1b Rangkaian ganti mini sel surya.....	30
Gambar 4.2a Hasil simulasi sel surya utama.....	31
Gambar 4.2b Hasil simulasi mini sel surya.....	31
Gambar 4.5a Blok diagram uji coba lengkap .....	33
Gambar 4.5b Blok diagram uji coba tanpa sel surya .....	33
Gambar 4.6a Grafik uji coba tanpa beban antara waktu dan tegangan superkapasitor.....	35
Gambar 4.6b Grafik uji coba tanpa beban antara tegangan superkapasitor dan tegangan <i>output</i> .....	35
Gambar 4.7a Grafik uji coba 1 dengan beban antara waktu dan tegangan superkapasitor.....	38
Gambar 4.7b Grafik uji coba 1 dengan beban antara tegangan superkapasitor dan tegangan <i>output</i> .....	38
Gambar 4.8a Grafik uji coba 2 dengan beban antara waktu dan tegangan superkapasitor.....	40
Gambar 4.8b Grafik uji coba 2 dengan beban antara tegangan superkapasitor dan tegangan <i>output</i> .....	40
Gambar 4.9a Grafik uji coba dengan beban tanpa sel surya antara waktu dan tegangan superkapasitor .....	42
Gambar 4.9b Grafik uji coba dengan beban tanpa sel surya antara tegangan superkapasitor dan tegangan <i>output</i> .....	42

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Wireless embedded system* telah digunakan untuk aplikasi-aplikasi baru yang membutuhkan kecepatan tinggi pada jaringan-jaringan berskala besar dengan jumlah *node* yang banyak. Suplai energi merupakan salah satu faktor penghambat utama untuk *wireless device* karena baterai yang digunakan hanya bertahan beberapa jam saja pada 100% *duty cycle*. Ketertarikan akan rangkaian penyuplai daya yang memanfaatkan lingkungan untuk menyuplai *embedded system* telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Sekarang ini, penggunaan panel surya kecil dapat memastikan operasi yang terus-menerus tanpa menggunakan baterai.

Rangkaian dengan menggunakan panel surya telah dibuat untuk meningkatkan kinerja dari *embedded system*. Rangkaian yang optimal dapat menghasilkan beberapa keuntungan, seperti penurunan ukuran modul fotovoltaik, penggunaan *energy buffer* yang kecil, serta unjuk kerja sistem yang lebih baik.

Karakteristik *output* dari sebuah panel surya akan berubah secara tidak linier dengan perubahan temperatur dan *irradiance*. Oleh karena itu, teknik *maximum power point tracking* (MPPT) digunakan untuk mendapatkan energi keluaran yang maksimum dari panel surya. Sejauh ini metode MPPT dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu untuk aplikasi panel surya berskala besar yang menggunakan *digital signal processor* (DSP) atau mikrokontroler dan untuk skala kecil yang biasanya tanpa menggunakan mikrokontroler. Untuk skala kecil tanpa mikrokontroler, metode mppt yang digunakan kurang akurat tetapi lebih murah. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi biaya untuk aplikasi di bawah 50 W. Sekarang ini, metode MPPT kelas ketiga difokuskan untuk skala yang lebih kecil lagi, yaitu panel surya yang hanya beberapa sentimeter persegi saja.

Banyak metode yang telah dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Metode *hill-climbing* yang menghitung secara langsung MPP dengan mengukur gradien dari daya keluaran berdasarkan tegangan keluaran. *Perturb and observe*

yang secara terus-menerus mengganggu sistem untuk mendapatkan MPP dan tegangan kerja. *Incremental conductance*, yaitu berdasarkan fakta bahwa kemiringan kurva daya pada MPP adalah nol, positif pada sebelah kiri MPP, dan negatif pada sebelah kanan MPP. *Fractional open circuit voltage* (FOCV) memanfaatkan hubungan linier antara  $V_{mpp}$  dan  $V_{oc}$  pada *irradiance* dan temperatur yang berubah-ubah. Metode ini sangat mudah dan murah untuk diimplementasikan dan tidak membutuhkan *digital controller*. Sama dengan FOCV, metode *fractional short circuit current* memanfaatkan hubungan linier antara  $I_{sc}$  dan  $I_{mpp}$ .

Pada skripsi ini akan dirancang modul penyuplai daya berbasis energi matahari untuk *embedded system* daya rendah. Penggunaan rangkaian MPPT yang sederhana dapat mengurangi ukuran dari modul fotovoltaik dan mengurangi kapasitas *energy buffer*. Modul tidak membutuhkan *energy buffer* yang sebelumnya sudah berisi energi seperti baterai. Fitur-fitur inilah yang membuat modul ini cocok untuk *embedded system* daya rendah.

Salah satu keuntungan menggunakan energi matahari adalah ketersediaan energi matahari yang dapat diperkirakan. Hal ini memungkinkan seseorang untuk merencanakan dan mengoptimalkan penggunaan sistem dalam beberapa waktu kedepan, sehingga mendapatkan sistem yang dapat bekerja secara terus-menerus.

## 1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah

Usia baterai yang digunakan untuk menyuplai daya pada *embedded system* hanya bertahan dalam beberapa jam saja. Hal ini membuat sistem pemeliharaan menjadi lebih rumit karena baterai harus sering di *recharge* atau diganti. Apalagi untuk *wireless sensor network* (WSN) yang memiliki banyak *node*. Modul penyuplai daya dengan energi matahari ini dibuat untuk dapat menggantikan baterai, sehingga sistem dapat bekerja terus-menerus dan proses pemeliharaan menjadi lebih mudah. Pada skripsi ini, permasalahan hanya terbatas pada modul penyuplai daya berbasis energi matahari yang dapat menggantikan baterai untuk *embedded system* daya rendah khususnya untuk *sensor node*.

### 1.3 Tujuan Penulisan

Skripsi ini bertujuan untuk merancang bangun suatu modul yang memanfaatkan energi matahari yang dapat digunakan untuk menyuplai daya pada *embedded system* daya rendah khususnya sensor *node* pada WSN sebagai pengganti baterai.

### 1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode literatur, yaitu dengan menggunakan buku-buku atau sumber-sumber yang dapat digunakan untuk menunjang penelitian. Dari literature-literatur tersebut kemudian akan dibuat rangkaian untuk disimulasikan terlebih dahulu. Nilai komponen-komponen pada rangkaian yang akan disimulasikan didapat dari data-data pada literatur. Setelah itu, dibuat rangkaian sebenarnya untuk diuji coba.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut. Bab 1 Pendahuluan, berisi tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan penelitian, metode penelitian, dan sistematika penelitian. Bab 2 Dasar Teori, berisi tentang teori-teori yang digunakan untuk menunjang penelitian, diantaranya adalah dasar-dasar sel surya, MPP *tracker*, dan super kapasitor. Bab 3 Disain Rangkaian, pada bab ini akan dijelaskan mengenai disain rangkaian yang akan dibuat untuk menggantikan baterai pada *embedded system*. Bab 4 Uji Coba dan Analisis, berisi mengenai hasil simulasi rangkaian sebelum rangkaian tersebut dibuat, hasil uji coba rangkaian, dan analisis. Bab 5 Kesimpulan, berisi kesimpulan mengenai hasil penelitian.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 Sel Surya

Sel surya adalah suatu elemen aktif yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan kutub negatif. Prinsip dasar pembuatan sel surya adalah dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik, yaitu efek yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik. Prinsip ini pertama kali dikemukakan oleh *Bacquere*, seorang ahli fisika Perancis pada tahun 1839. Apabila sebuah logam dikenai suatu cahaya dalam bentuk foton dengan frekuensi tertentu, maka energi kinetik dari foton akan menembak ke atom-atom logam tersebut. Atom logam yang terkena radiasi akan melepaskan elektron-elektronnya. Elektron-elektron bebas inilah yang membuat arus dapat mengalir dengan jumlah tertentu.

Syarat utama untuk konversi energi fotovoltaiik adalah sebuah sambungan (*junction*) pada struktur semikonduktor. Ketika semikonduktor tipe n dan tipe p disambungkan, elektron-elektron dari daerah n yang dekat dengan *junction* akan mengalir menuju semikonduktor tipe p dan meninggalkan suatu lapisan yang bermuatan positif. Dengan cara yang sama, *hole* akan mengalir berlawanan arah dengan elektron dan meninggalkan suatu lapisan bermuatan negatif. *Junction* akan terbentuk ketika keadaan seimbang telah tercapai (*steady state*). Pada *junction* ini tidak terdapat muatan yang bergerak, oleh karena itu dinamakan daerah deplesi. Sambungan p-n dapat dihubungkan dengan baterai secara *forward bias* ataupun *reverse bias*.

Ketika sel surya terkena cahaya, maka pasangan-pasangan elektron dan *hole* dibangkitkan. Hal ini mengakibatkan timbulnya arus foto  $I_L$  (*photo current*). Arus ini mengalir berlawanan dengan arus gelap (*dark current*). Meskipun tidak ada tegangan luar yang diberikan, arus foto ini terus mengalir yang kemudian disebut sebagai arus hubung pendek  $I_{sc}$ . Arus ini tergantung pada intensitas



cahaya. Semakin banyak cahaya yang diserap, maka semakin banyak pula elektron yang mengalir.

Arus total ditentukan oleh besarnya  $I_L$  dan  $I_D$ . [1]

$$I = I_D - I_L \quad (2.1)$$

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2.2)$$

$I_D$  = Arus gelap dioda (dark current)

$I$  = Arus total

$I_0$  = Arus saturasi

$e$  = muatan elektron

$k$  = Konstanta Boltzmann

$T$  = Temperatur

Fenomena ini dinamakan efek fotovoltaik.

## 2.2 Parameter Dasar Sel Surya

Ada beberapa parameter dasar yang diperlukan untuk menjelaskan karakteristik arus-tegangan dari suatu sel surya.

### A. Arus total (I)

Arus total ditentukan oleh nilai arus induksi oleh cahaya  $I_L$  dan arus gelap dioda  $I_D$ . Besar arus total dapat ditentukan dengan Persamaan 2.3. [1]

Arus total (I) = Arus gelap dioda ( $I_D$ ) – Arus induksi oleh cahaya ( $I_L$ )

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2.3)$$

$I$  = Arus total

$I_0$  = Arus saturasi

$I_L$  = Arus foto

$e$  = muatan elektron

$k$  = Konstanta Boltzmann

$T$  = Temperatur

Nilai  $I_L$  dan  $I_0$  bergantung pada struktur sel surya.

#### B. Arus hubung singkat ( $I_{SC}$ )

Arus hubung singkat adalah arus yang dibangkitkan oleh cahaya atau disebut juga arus foto  $I_L$  (*photo current*). Arus hubung singkat merupakan arus pada rangkaian ketika tidak ada hambatan. Arus hubung singkat didapatkan dengan menghubungkan kutub positif dan kutub negatif dengan kawat tembaga.

#### C. Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{OC}$ )

Tegangan rangkaian terbuka didapat dengan menetapkan  $I = 0$  pada persamaan arus,  $V = V_{OC}$  ketika  $I = 0$ . [1]

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.4)$$

$V_{oc}$  = Tegangan rangkaian terbuka

$k$  = Konstanta Boltzman

$T$  = Temperatur

$I_0$  = Arus saturasi

$I_L$  = Arus foto

$e$  = muatan elektron

Tegangan rangkaian terbuka adalah tegangan ketika beban maksimum. Dari Persamaan 2.4, nilai dari tegangan rangkaian terbuka bergantung secara logaritmik pada perbandingan antara  $I_L/I_0$ .

#### D. *Fill Factor* (FF)

*Fill factor* yang dikenal juga sebagai faktor kurva adalah suatu ukuran ketajaman kelengkungan dari suatu kurva I-V. *Fill factor* menunjukkan seberapa baik *junction* dan seberapa rendah hambatan seri yang dibuat pada sebuah sel. Hambatan seri membuat nilai *fill factor* rendah. *Fill factor* akan cenderung

tinggi, jika nilai tegangan rangkaian terbuka tinggi. Idealnya, nilai dari *fill factor* adalah satu. Nilai ini tidak mungkin bisa didapat. Nilai maksimum *fill factor* untuk silikon adalah 0,88.

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.5)$$

FF = *Fill factor*

$P_{\max}$  = Daya maksimum

$I_{\max}$  = Arus saat daya maksimum

$V_{\max}$  = Tegangan saat daya maksimum

$V_{oc}$  = Tegangan rangkaian terbuka

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat

#### E. Daya Maksimum

Tidak ada daya yang dibangkitkan ketika hubung singkat atau hubung terbuka. Daya *output* ditentukan dengan [1]

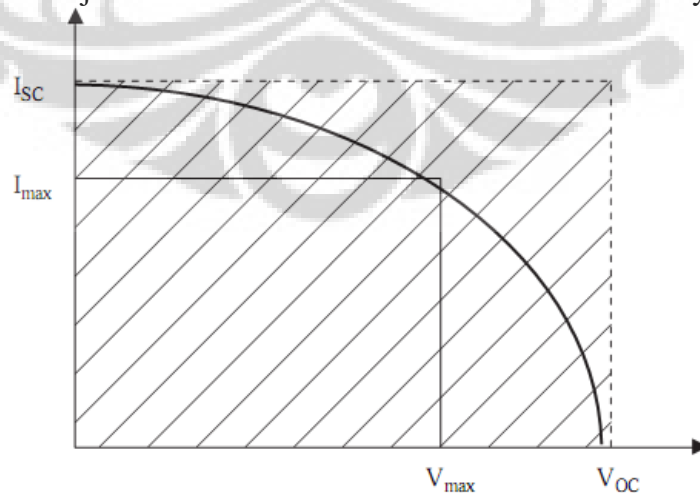
$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \quad (2.6)$$

$P_{out}$  = Daya *output*

$V_{out}$  = Tegangan *output*

$I_{out}$  = Arus *output*

Gambar 2.1 menunjukkan kurva karakteristik untuk menentukan daya maksimum.



Gambar 2.1 Kurva karakteristik untuk menentukan daya maksimum. [1]

Daya maksimum  $P_{\max}$  yang dihasilkan sel surya didapatkan pada titik ketika hasil kali arus dan tegangan adalah maksimum pada kurva karakteristik. [1]

$$P_{\max} = I_{\max} \times V_{\max} \quad (2.7)$$

$P_{\max}$  = Daya maksimum

$I_{\max}$  = Arus ketika daya maksimum

$V_{\max}$  = Tegangan ketika daya maksimum

Daya *output* maksimum yang mungkin dicapai dapat ditentukan dengan [1]

$$P_{\max} = I_{SC} \times V_{OC} \times FF \quad (2.8)$$

$P_{\max}$  = Daya maksimum

$V_{OC}$  = Tegangan rangkaian terbuka

$I_{SC}$  = Arus hubung singkat

$FF$  = *Fill factor*

dimana  $FF$  dapat dilihat pada Persamaan (2.5)

#### F. Efisiensi sel surya

Efisiensi sel surya dapat ditentukan dengan Persamaan 2.9 [1]

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{\text{Incident solar radiation} \times \text{Area of solar cell}} \quad (2.9)$$

$$= \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{I(t) \times A_c}$$

$\eta$  = Efisiensi sel surya

$P_{in}$  = Daya yang masuk sel surya

$P_{\max}$  = Daya maksimum

$I_{\max}$  = Arus ketika daya maksimum

$V_{\max}$  = Tegangan ketika daya maksimum

$V_{OC}$  = Tegangan rangkaian terbuka

$I_{SC}$  = Arus hubung singkat

$FF$  = *Fill factor*

$I(t)$  = Radiasi matahari

$A_c$  = Area sel surya

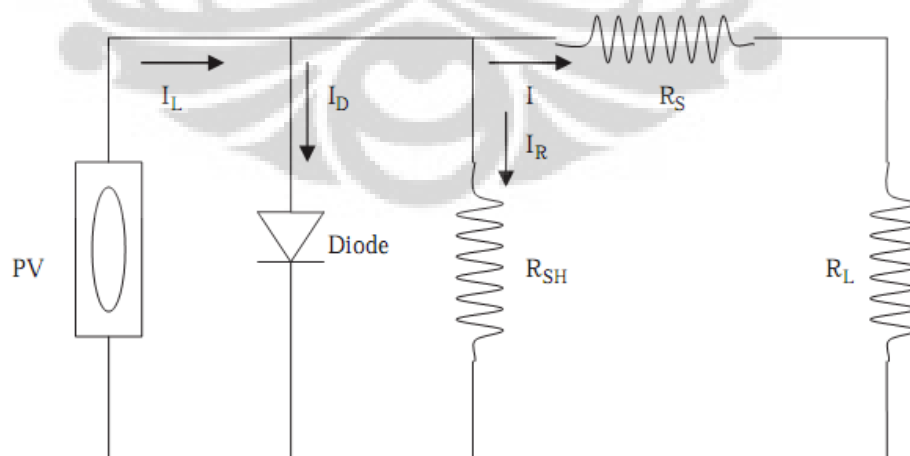
$I_{\max}$  dan  $V_{\max}$  merupakan arus dan tegangan untuk daya maksimum yang bersesuaian dengan intensitas cahaya  $I(t)$ .

### G. Batas efisiensi sel

Efisiensi sel fotovoltaik dibatasi oleh banyak *losses*. Beberapa *losses* dapat dihindari, tetapi ada beberapa yang tidak dapat dihindari karena terjadi di dalam sistem.

1. Permukaan dilapisi dengan kontak metal untuk menurunkan hambatan seri pada permukaan. Kontak ini mempunyai area tertentu dan menutupi sebagian area aktif dari sel, sehingga menghalangi radiasi cahaya yang masuk.
2. Reflektansi semikonduktor tinggi, yaitu sekitar 40% dari cahaya yang mengenai permukaan.
3. Energi foton yang kurang dari  $E_g$  semikonduktor tidak menghasilkan arus.
4. Energi foton yang berlebih ( $h\nu - E_g$ ) berubah menjadi panas.
5. Karakteristik I-V sebuah sel surya sangat dipengaruhi oleh karakteristik dioda p-n. Oleh karena itu, ketika *output* sel surya meningkat mendekati  $V_{OC}$ , dioda menjadi ter *forward bias* dengan kuat, sehingga meningkatkan arus rekombinasi  $I_r$  pada junction. Karakteristik ini yang dianggap sebagai *loss* utama pada sistem.

Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian ekuivalen sel surya.

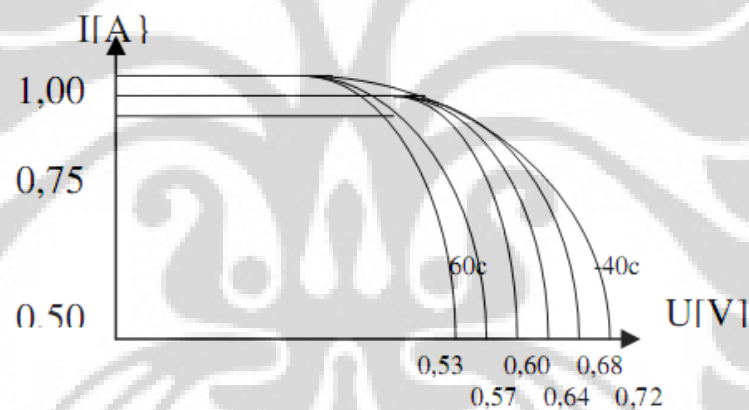


Gambar 2.2. Rangkaian ekuivalen sel surya [1]

## J. Pengaruh temperatur

Dengan penyinaran yang konstan, daya sel surya berkurang sesuai kenaikan temperatur. Hal ini sesuai dengan sifat tegangan rangkaian terbuka dan arus hubung singkat. Tegangan rangkaian terbuka berkurang sesuai dengan kenaikan temperatur yang besarnya lebih kurang 3 mV/K, sedangkan arus hubung singkat akan bertambah sesuai dengan kenaikan temperatur yang besarnya lebih kurang 0,1%/K. Kurva karakteristik dengan temperatur yang berbeda-beda dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Dari Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa penurunan tegangan jauh lebih besar dibandingkan dengan kenaikan arus. Hal ini menyebabkan daya yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Sebaiknya, sel surya ditempatkan pada temperatur yang tidak terlalu panas agar penurunan tegangan tidak terlalu besar.



Gambar 2.3. Pengaruh temperatur terhadap kurva karakteristik [2]

### 2.3 Maximum Power Point Tracker

Titik daya maksimum (MPP) merupakan target operasi suatu sistem fotovoltaik. Rangkaian *maximum power point tracker* (MPPT) dapat digunakan untuk memenuhi target operasi tersebut. MPPT adalah konverter DC-DC yang memiliki efisiensi tinggi. MPPT berfungsi sebagai beban elektrik yang optimal untuk sel fotovoltaik yang kemudian mengubah daya dari fotovoltaik tersebut menjadi tegangan atau arus untuk dapat digunakan oleh beban apapun. Sel fotovoltaik mempunyai suatu titik operasi dimana nilai arus dan tensiangannya

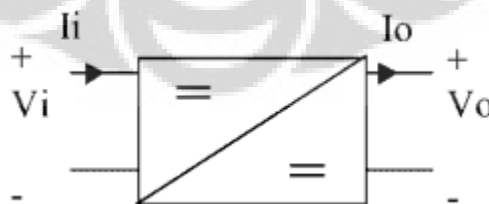
menghasilkan daya *output* maksimum. Arus dan tegangan pada sel fotovoltaik mempunyai hubungan eksponensial, dan titik daya maksimum (MPP) didapatkan pada kelengkungan kurva arus-tegangan, ketika hasil kali antara arus dan tegangannya menghasilkan nilai yang maksimum. MPPT menggunakan rangkaian kontrol untuk mencari titik tersebut. Kemudian, daya maksimum yang dihasilkan sel surya akan diambil oleh rangkaian konverter.

MPPT bukan alat yang mencari daya maksimum dengan mengubah posisi panel surya agar terkena cahaya matahari secara langsung. MPPT merupakan murni sistem elektronika yang dapat mengatur panel surya agar dapat mengirimkan daya maksimum yang tersedia. MPPT dapat digunakan bersama dengan sistem pencari daya maksimum mekanik, tetapi dua sistem ini sama sekali berbeda.

Rangkaian pembalik (*inverter*) suatu fotovoltaik memanfaatkan MPPT untuk mendapatkan daya maksimum dari *PV array*, kemudian mengubahnya menjadi arus/tegangan bolak-balik (AC) dan menjualnya kepada operator jaringan listrik.

Manfaat terbesar dari regulator MPPT dapat dirasakan saat cuaca dingin, berawan, atau berkabut. MPPT juga dapat digunakan untuk menggerakkan motor-motor langsung dari panel surya. Manfaatnya sangat besar, apalagi jika beban motor tersebut berubah-ubah.

Pada dasarnya MPPT adalah konverter DC-DC, sehingga kita dapat menggambarannya seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram skematik konverter DC-DC [3]

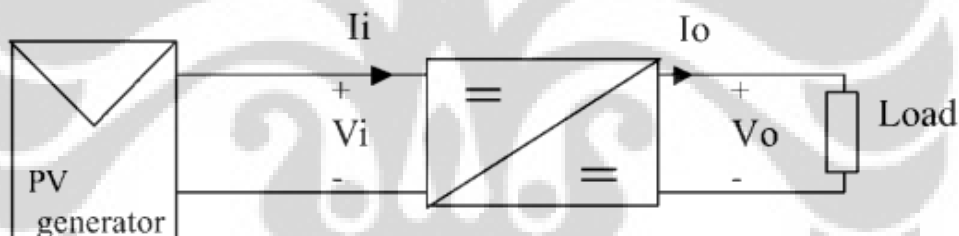
Pada DC-DC *tracker*, impedansi *input* dari konverter DC-DC harus diatur sedemikian rupa agar fotovoltaik dapat bekerja pada titik daya maksimumnya.

*Output* konverter DC-DC juga harus disesuaikan dengan karakteristik beban. Konverter DC-DC dapat menghasilkan daya *output* yang berbeda-beda meskipun dengan tegangan *input* yang konstan. Tegangan *output* dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan *input* sesuai dengan kebutuhan beban. Oleh karena itu, konverter DC-DC dapat dibagi menjadi dua kelompok.

1. *Step-down* atau *buck converter*
2. *Step-up* atau *boost converter*

Jenis lain dari konverter DC-DC adalah konverter DC-DC *full-bridge*, konverter *CuK*, dan konverter *buck-boost*. Masing-masing dapat digunakan pada aplikasi-aplikasi dengan tujuan tertentu, seperti tegangan *output* yang polaritasnya berlawanan dengan tegangan *input*.

Gambar (2.5) menunjukkan sistem fotovoltaik dengan konverter DC-DC yang dihubungkan dengan beban.



Gambar 2.5. Diagram blok sistem fotovoltaik dengan konverter DC-DC [3]

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa konverter DC-DC dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu konverter *buck* dan konverter *boost*. Oleh karena itu, rangkaian MPPT yang dibuat, didasarkan pada jenis dua konverter tadi, sehingga pada dasarnya ada dua jenis MPPT, yaitu MPPT yang berdasarkan konverter *buck* dan MPPT yang berdasarkan konverter *boost*.

#### A. MPPT berdasarkan konverter *buck*

Rangkaian dasar untuk konverter *buck* dapat dilihat pada Gambar 2.6. *Switch* membuka dan menutup rangkaian *input*. Sinyal kontrol sebuah *switch* biasanya memiliki periode  $T$  dan *duty cycle*.

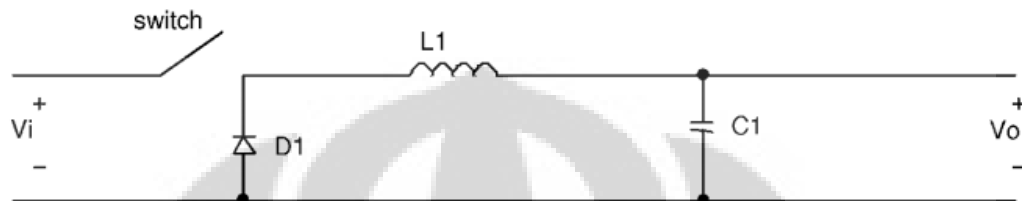


$$Dc = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.10)$$

Dc = Duty cycle

Ton = Waktu selama kondisi on

T = Periode



Gambar 2.6. Rangkaian dasar konverter *buck* [3]

Dengan mempertimbangkan *switch* yang ideal, tegangan *input*  $V_i$  yang konstan, dan beban resistif murni pada *output*, rata-rata tegangan *output*  $V_o$  dapat dicari dengan Persamaan (2.11). [3]

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} v_i(t) dt = Dc V_i \quad (2.11)$$

$V_o$  = Tegangan *output*

$V_i$  = Tegangan *input*

T = Periode

$t_{on}$  = waktu selama kondisi *on*

Jika *duty cycle* kurang dari satu, maka Persamaan (2.11) menghasilkan nilai tegangan *output* yang lebih kecil dari tegangan *input*  $V_o < V_i$ .

Tegangan *output* dari konverter dapat diatur dengan memilih nilai *duty cycle* yang sesuai dengan keperluan. Untuk konverter DC-DC yang ideal dengan nilai efisiensi  $\eta = 1$ , nilai daya *output* harus sama dengan nilai daya *input*. *Duty cycle* dapat diatur untuk mendapatkan tegangan *input* pada titik daya maksimum dari panel surya.

$$P_i = P_o \quad (2.12)$$

$$V_i I_i = V_o I_o \quad (2.13)$$

$$V_o/V_i = Dc = I_i/I_o \quad (2.14)$$

$P_i$  = Daya *input*

$P_o$  = Daya *output*

$V_i$  = Tegangan *input*

$I_i$  = Arus *input*

$V_o$  = Tegangan *output*

$I_o$  = Arus *output*

$Dc$  = *Duty cycle*

Pada aplikasi fotovoltaik, konverter buck DC-DC biasanya digunakan sebagai penyuplai daya. Tegangan *input*  $V_i$  adalah sebuah variabel yang bergantung pada temperatur dan *irradiance* dengan tegangan *output* yang konstan.

#### B. MPPT berdasarkan konverter *boost*

Rangkaian dasar konverter *boost* dapat dilihat pada Gambar 2.7. Dapat dilihat bahwa rangkaianannya memiliki komponen yang sama dengan rangkaian konverter *buck*, akan tetapi susunannya berbeda. *Switch* diatur dengan sinyal kontrol yang memiliki periode  $T$  konstan dan *duty cycle* yang dapat diubah-ubah.

Pada konverter ini, tegangan *output*  $V_o$  selalu lebih besar dari tegangan *input*  $V_i$ . Hubungan antara tegangan *input* dan tegangan *output* merupakan fungsi dari *duty cycle*.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1 - Dc} \quad (2.15)$$

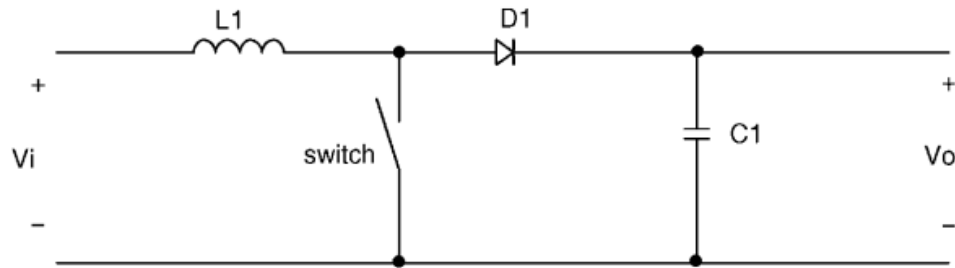
$V_o$  = Tegangan *output*

$V_i$  = Tegangan *input*

$T$  = Periode

$t_{off}$  = waktu selama kondisi *off*

$Dc$  = *Duty cycle*



Gambar 2.7. Rangkaian dasar konverter *boost* [3]

Untuk konverter yang ideal tanpa daya yang terbuang, nilai efisiensi  $\eta = 1$ . Nilai daya *input* sama dengan daya *output*.

$$P_i = P_o \quad (2.16)$$

$$V_i I_i = V_o I_o \quad (2.17)$$

$$(1 - D_c) = I_i / I_o \quad (2.18)$$

$P_i$  = Daya *input*

$P_o$  = Daya *output*

$V_i$  = Tegangan *input*

$I_i$  = Arus *input*

$V_o$  = Tegangan *output*

$I_o$  = Arus *output*

$D_c$  = *Duty cycle*

Seperti pada konverter *buck*, tegangan *input* pada saat titik daya maksimum didapat dengan mengatur nilai *duty cyclenya*.

Ketika konverter DC-DC digunakan sebagai MPPT, sinyal kontrol digunakan untuk mengontrol keadaan *switch*. Biasanya sinyal ini dibangkitkan dengan menggunakan *pulse width modulation* (PWM).

## 2.4 Metode MPPT

Beberapa tahun terakhir, metode-metode yang digunakan pada MPPT berkembang dengan pesat. Tujuan dari metode-metode ini, yaitu untuk mendapatkan daya maksimum dari suatu panel surya. Beberapa metode untuk menghasilkan daya maksimum adalah dengan memantau daya *output* dan

menetapkan tegangan *output* sebagai bagian dari tegangan hubung terbuka. Berikut akan dijelaskan beberapa metode yang digunakan untuk MPPT.

### 1. *Hill-Climbing/Perturb and Observe (P&O)*

Cara kerja metode ini adalah sebagai berikut: Gangguan diberikan pada rangkaian, dan jika gangguan (tegangan sel surya naik atau turun) mengakibatkan daya sel surya naik, gangguan selanjutnya dibuat searah. Sebaliknya, jika gangguan membuat daya sel surya turun, maka gangguan berikutnya dibuat berlawanan arah. Jika kita mengacu pada kurva karakteristik pada Gambar 2.1, gangguan seperti ini akan mengakibatkan sel surya beroperasi mendekati titik daya maksimum. Langkah tersebut terus diulang sampai nilai daya maksimum didapatkan. Metode *hill-climbing* atau P&O menggunakan DSP atau mikrokontroler.

### 2. *Incremental Conductance*

Metode ini didasarkan pada fakta bahwa kemiringan kurva daya pada MPP adalah nol, positif pada sebelah kiri MPP dan negatif pada sebelah kanan MPP. Dengan menggunakan perhitungan, operasi sel surya diperiksa secara periodik menggunakan DSP atau mikrokontroler. Dari hasil itu, titik operasi sel surya digeser naik atau turun sampai MPP dicapai.

### 3. *Fractional Open Circuit Voltage*

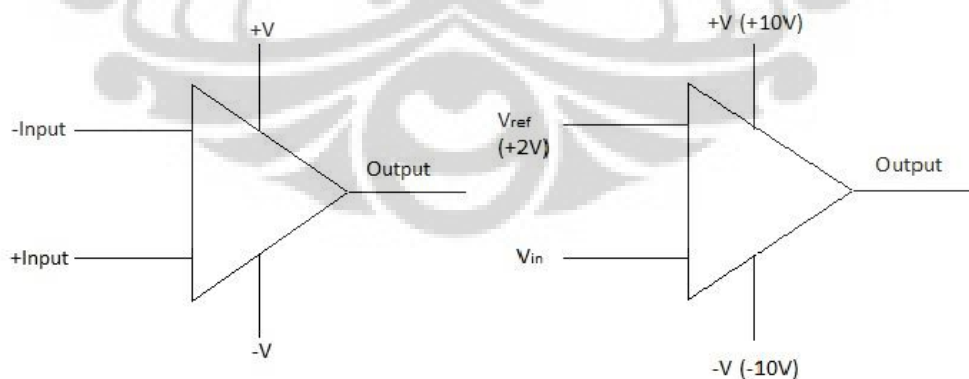
Pada temperatur dan *irradiance* yang berubah-ubah, hubungan antara  $V_{MPP}$  dan  $V_{OC}$  adalah mendekati linear. Faktor linier ini bergantung pada karakteristik sel surya. Oleh karena itu,  $V_{MPP}$  dan  $V_{OC}$  harus diukur terlebih dahulu. Tegangan  $V_{MPP}$  dapat dihitung berdasarkan nilai  $V_{OC}$  yang diukur secara berkala dengan memutuskan sementara konverter yang terhubung dengan sel surya. Sel surya jarang beroperasi pada MPP nya, karena hubungan linier ini hanya pendekatan. Meskipun demikian, metode ini sangat mudah untuk dilakukan dan murah karena tidak memerlukan DSP atau mikrokontroler.

#### 4. Fractional Short Circuit Current

*Fractional Short Circuit Current* memanfaatkan fakta bahwa hubungan antara  $I_{SC}$  dan  $I_{MPP}$  adalah mendekati linier. Seperti pada metode fractional  $V_{OC}$ , faktor linier harus ditentukan untuk tiap-tiap sel surya. Sulit untuk mengukur arus saat sel surya bekerja. Switch tambahan biasanya ditambahkan pada konverter untuk menghubungkan singkat sel surya untuk mendapatkan arus hubung singkat. Dengan menggunakan metode ini, MPP tidak akan pernah tercapai.

### 2.5 Komparator Tegangan

Rangkaian komparator membandingkan dua tegangan kemudian menghasilkan suatu tegangan *output* sebagai hasil perbandingan tadi. Komparator merupakan konverter analog ke digital yang banyak digunakan. *Input* dari suatu komparator adalah tegangan analog. Nilai tegangan tersebut kemudian dianalisa, dan dilihat apakah nilainya itu di atas atau di bawah tegangan referensi. Rangkaian dasar komparator ditunjukkan pada Gambar 2.8 (a). *Output* sebuah komparator adalah tegangan digital. Ketika *input noninverting* (+) lebih besar dari tegangan *input inverting*, tegangan digital *output* mengikuti nilai saturasi tegangan yang lebih tinggi. Sebaliknya, jika *input noninverting* lebih rendah dari *input inverting*, maka tegangan digital *output* akan mengikuti nilai saturasi tegangan yang lebih rendah. Gambar 2.8(b) menunjukkan aplikasi komparator pada umumnya.



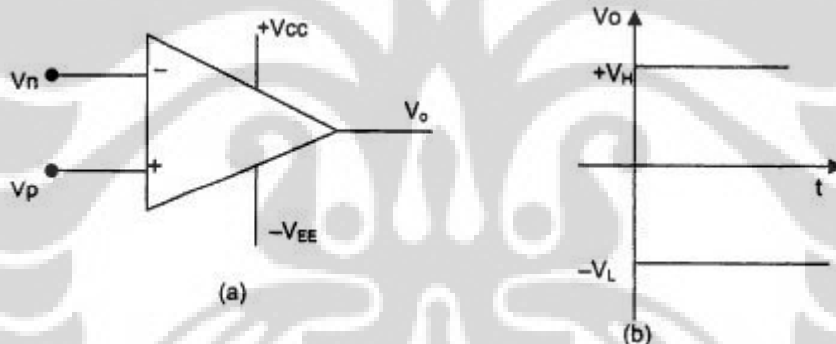
Gambar 2.8. (a) Bentuk dasar (b) Aplikasi pada umumnya [4]

*Input inverting* dihubungkan dengan tegangan referensi, dan *noninverting* dihubungkan dengan tegangan *input*. Selama  $V_{in}$  lebih kecil dari  $V_{ref}$  (2V pada contoh), tegangan *output* akan mengikuti tegangan yang lebih rendah (-10V). Ketika  $V_{in}$  naik melebihi  $V_{ref}$ , tegangan *output* berubah mengikuti tegangan yang lebih tinggi (10V). Oleh karena itu, tegangan *output* yang tinggi menunjukkan bahwa nilai tegangan *input* lebih besar dari 2V. Kita dapat melihat cara kerja komparator menggunakan op-amp, karena memang rangkaian dalam komparator terdiri dari op-amp dengan penguat tegangan yang tinggi. Op-amp sebagai komparator mempunyai karakteristik seperti pada Gambar 2.9. Pada *output* ( $V_o$ ) hanya terjadi  $+V_H$  (*high*) atau  $-V_L$  (*low*) dengan syarat sebagai berikut,

Jika:  $V_p > V_n \rightarrow V_o = +V_H$  (*high*)

$V_p < V_n \rightarrow V_o = -V_L$  (*low*)

Catatan: Jika  $-V_{EE}$  diketanahkan, maka  $-V_L = 0$



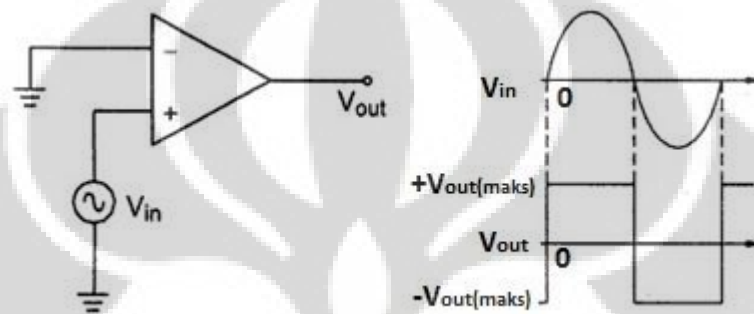
Gambar 2.9. (a) Op-amp sebagai komparator. (b) karakteristik *output* [5]

### Deteksi Level Nol (*Zero Level Detection*)

Komparator deteksi level nol membandingkan sinyal *input* terhadap referensi nol (*ground*). Hal ini dapat dilakukan dengan menyetan terminal *inverting* dan sinyal *input* ac diberikan ketterminal *noninverting* seperti pada Gambar 2.10 (a). Dengan kondisi ini, tanpa ada umpan balik dari *output* ke *input*, maka pada *output* akan terjadi penguatan loop terbuka ( $A_{ol}$ ). Jadi misalnya  $A_{ol} = 100.000$ , untuk sinyal yang sangat kecil, dan  $V_{in} = \pm 0,25$  mV, maka tegangan ini pada *output* sebenarnya sudah mencapai  $\pm 25$  V. Dengan keterbatasan op-amp,

yang biasanya tegangan kerja op-amp sekitar  $\pm 15$  V menyebabkan pada *output* langsung terjadi kondisi saturasi ( $\pm 25$  V  $\rightarrow$   $\pm 15$  V).

Untuk sinyal *input* ac sinusoidal yang mempunyai tegangan maksimum 1V, maka hampir semua periode siklus positif pada *output* komparator akan berada pada kondisi saturasi  $+V_{maks}$  (*high*) dan hampir semua periode siklus negatif berada pada kondisi saturasi  $-V_{maks}$  (*low*), seperti terlihat pada Gambar 2.10 (b). Dikatakan bahwa komparator mendeteksi pada level nol.

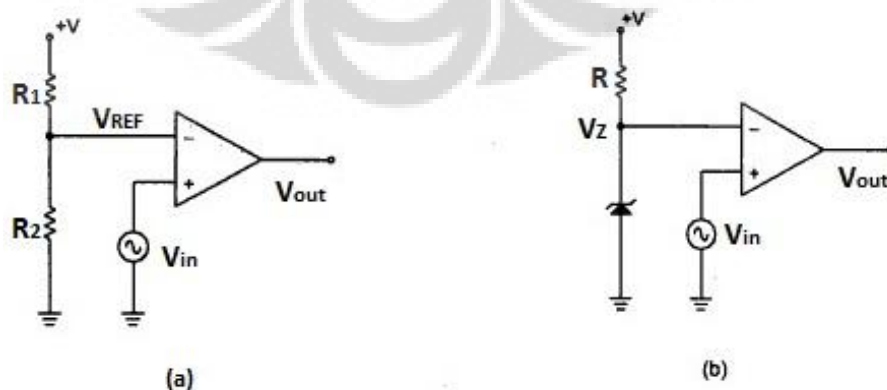


Gambar 2.10. (a) Komparator deteksi tingkat nol (b) Grafik tegangan *input* dan *output* [5]

### Deteksi Level Bukan Nol (*Nonzero Level Detection*)

Komparator dapat mendeteksi suatu sinyal pada tingkat tegangan tertentu, atau bukan nol. Hal ini dapat dilakukan dengan memberikan tegangan referensi ( $V_{REF}$ ) pada salah satu terminal *input*.

Ada beberapa cara untuk mendapatkan tegangan referensi. Contohnya pada Gambar 2.11 (a), yaitu dengan pembagi tegangan atau seperti Gambar 2.11(b) menggunakan dioda zener.



Gambar 2.11. (a) Referensi komparator dengan pembagi tegangan (b) Referensi komparator dengan zener [5]

Sesuai dengan karakteristik op-amp sebagai komparator, jika

$$V_{in} > V_{REF} \rightarrow V_{out} = +V_{out(maks)} \text{ (high)}$$

$$V_{in} < V_{REF} \rightarrow V_{out} = -V_{out(maks)} \text{ (low)}$$

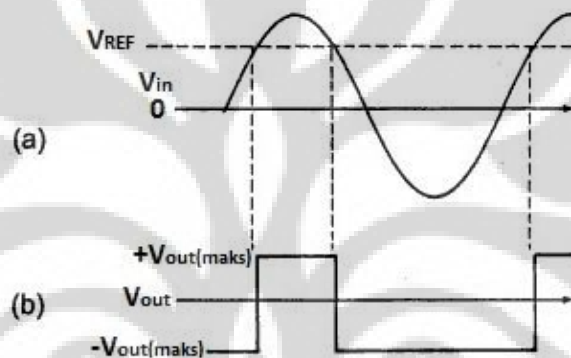
$V_{in}$  = Tegangan *input*

$V_{REF}$  = Tegangan referensi

$V_{out}$  = Tegangan *output*

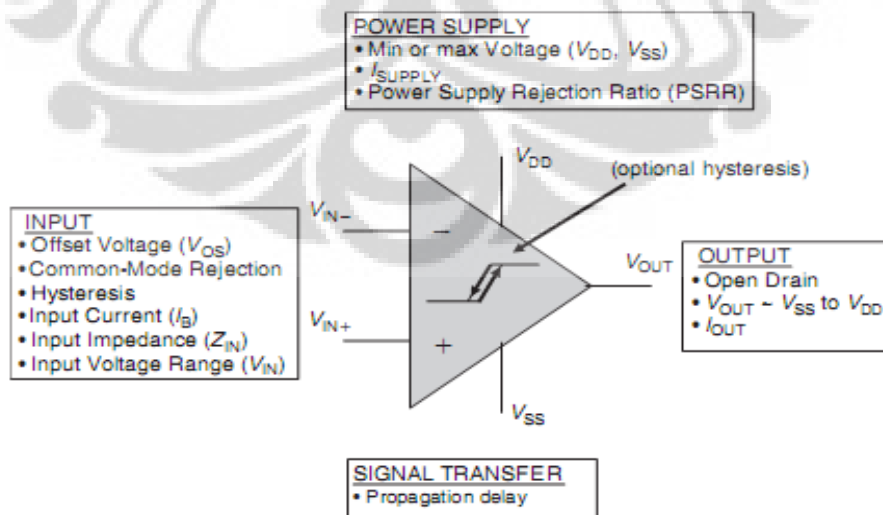
$V_{out(maks)}$  = tegangan *output* maksimum

maka, untuk sinyal *input* ac seperti pada Gambar 2.12 (a), hasil *output* seperti pada Gambar 2.12 (b).



Gambar 2.12. (a) Sinyal *input* ac. (b) Sinyal *output*[5]

Beberapa komparator mempunyai spesifikasi-spesifikasi tertentu sesuai dengan kebutuhan, diantaranya, yaitu rentang tegangan *input*, tegangan *offset input*, dan *input hysteresis*. Diagramnya dapat dilihat pada Gambar 2.13.



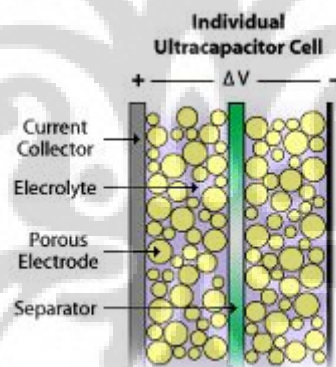
Gambar 2.13. Komparator dengan beberapa spesifikasi khusus [6]



## 2.6 Superkapasitor

Superkapasitor merupakan alat penyimpan energi yang dikenal juga dengan nama ultrakapasitor atau EDLCs (*Electrochemical Double Layer Capacitor*). Proses penyimpanan energi pada superkapasitor sama dengan kapasitor konvensional. Akan tetapi, muatan listriknya tidak berkumpul pada dua konduktor, tetapi berkumpul diantara konduktor dan elektrolit. Muatan-muatan listrik yang terkumpul membentuk lapisan ganda elektrik (*electric double-layer*), ketebalan pemisah antara lapisan tersebut hanya beberapa angstrom.

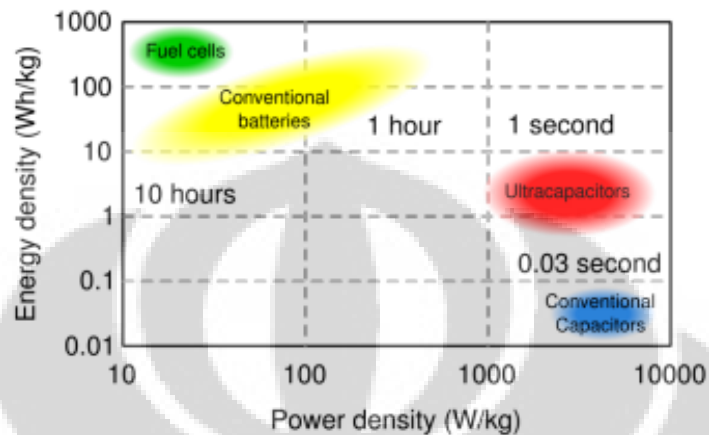
Superkapasitor terdiri dari dua elektroda Gambar 2.16, sehingga memungkinkan untuk dihubungkan dengan sumber tegangan. lapisan ganda (*double-layer*) bisa terbentuk karena adanya dua elektroda ini juga, masing-masing pada kontak antara elektroda dan elektrolit. Pemisah ditempatkan diantara dua elektroda untuk mencegah kontak elektrik. Bahan-bahan pembuat elektroda diantaranya adalah *metal oxide*, *conducting polymer*, *carbon aerogel*, atau *carbon nanotube*.



Gambar 2.14. Superkapasitor [7]

Kapasitansi yang tinggi diperoleh karena permukaan kontak elektroda-elektrolit yang luas dan lapisan pemisah yang tipis. Densitas energi yang tinggi diperoleh karena kapasitansi yang tinggi. Tegangan kerja superkapasitor dikontrol oleh tegangan *breakdown* bahan pelarut (*solvent*) pada elektrolit. Elektrolit organik memiliki tegangan *breakdown* mulai dari 2,5V hingga 3V. Superkapasitor yang ada sekarang tersedia dengan kapasitas mulai dari ratusan milifarad sampai 3000 farad.

Gambar 2.17 menunjukkan grafik Ragone yang digunakan untuk membandingkan kinerja beberapa alat penyimpanan energi. Grafik menunjukkan hubungan antara rapat energi (dalam Wh/Kg) dan rapat daya (dalam W/Kg).



Gambar 2.15. Grafik Ragone menunjukkan rapat energi vs rapat daya [7]

Sumbu vertikal menggambarkan seberapa banyak energi yang tersedia, sedangkan sumbu horizontal menggambarkan seberapa cepat energi tersebut dapat dikirimkan. Superkapasitor menawarkan densitas daya yang jauh lebih tinggi dari baterai, karena superkapasitor memiliki hambatan seri ekuivalen yang rendah, tetapi rapat energi superkapasitor lebih rendah dari baterai. Hal ini menyebabkan superkapasitor tidak cocok digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan daya tinggi. Persamaan 2.19[11] menunjukkan energi yang tersimpan dalam sebuah super kapasitor.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.19)$$

E = energi yang tersimpan dalam kapasitor (Joule)

C = kapasitansi kapasitor (Farad)

V = tegangan kapasitor (Volt)

Berikut ini adalah kelebihan dan kekurangan superkapasitor, jika dibandingkan dengan baterai.

## 1. Kelebihan

### a. Usia hidup jauh lebih lama

Superkapasitor pada umumnya memiliki siklus pengisian (*charge-discharge*) lebih dari setengah juta kali dan 10 tahun kerja sampai kapasitasnya turun 20%. Pada Baterai, setiap kali siklus pengisian menyebabkan kondisi elektrolit dan elektroda memburuk, karena pengisian baterai bergantung pada reaksi kimia antara elektrolit dan elektrodanya. Biasanya siklus baterai hanya sekitar beberapa ribu kali saja.

### b. Efisiensi tinggi

Efisiensi superkapasitor sangat tinggi. Superkapasitor dapat mencapai efisiensi siklus sebesar 97%.

### c. Densitas daya lebih tinggi

Superkapasitor bisa *discharge* dalam waktu beberapa milidetik dan dapat menghasilkan arus yang tinggi.

### d. Proses pengisian lebih cepat

Proses pengisian baterai lebih lama karena melibatkan proses kimia.

### e. Ramah lingkungan

Superkapasitor tidak mengandung bahan yang berbahaya bagi lingkungan.

## 2. Kekurangan

### a. Rapat energi lebih rendah

Untuk mencegah ukuran yang terlalu besar, superkapasitor hanya dianjurkan untuk aplikasi-aplikasi daya rendah saja.

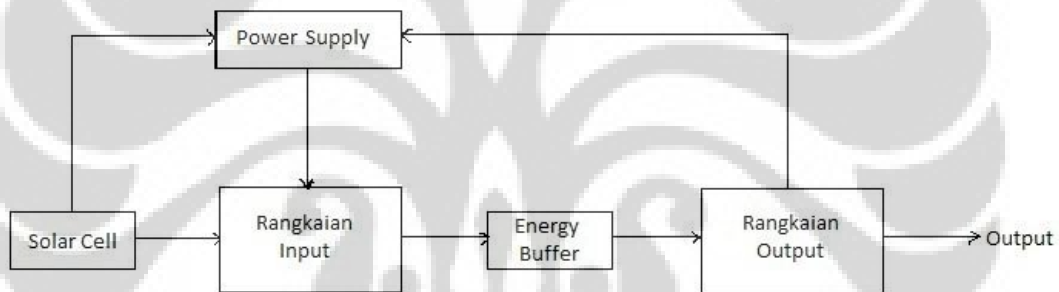
### b. Tegangan bergantung pada energi yang disimpan

### c. Tegangan *breakdown* rendah

## BAB 3

### DISAIN RANGKAIAN MODUL PENYUPLAI DAYA DENGAN MEMANFAATKAN ENERGI MATAHARI UNTUK *WIRELESS SENSOR NODE*

Pada bab ini akan dibahas mengenai rangkaian modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari. Modul ini ditargetkan untuk menyuplai *embedded system* daya rendah khususnya *wireless sensor node* dengan tegangan kerja 3,3 volt dan konsumsi daya sampai dengan 50 miliwatt. Salah satu contoh dari *embedded system* daya rendah adalah *sensor node* IEEE 802.15.4/Zigbee yang digunakan pada WSN. *Embedded system* ini berbasis pada *Freescale System-in-Package* MC13213 dan sudah termasuk RF *transceiver* untuk aplikasi-aplikasi ZigBee. Daya yang dibutuhkan oleh alat ini adalah  $< 1\text{mW}$  untuk keadaan *stand-by* dan mencapai sekitar 50mW untuk keadaan aktif.



Gambar 3.1. Blok diagram rangkaian modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari

Rangkaian modul penyuplai daya ini secara garis besar dapat dibagi menjadi tiga, yaitu rangkaian *input*, rangkaian *output*, dan rangkaian *power supply*. Blok diagram rangkaian modul dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Berikut ini akan dijelaskan mengenai rangkaian *input*, *output* dan rangkaian lengkap modul penyuplai daya tersebut.

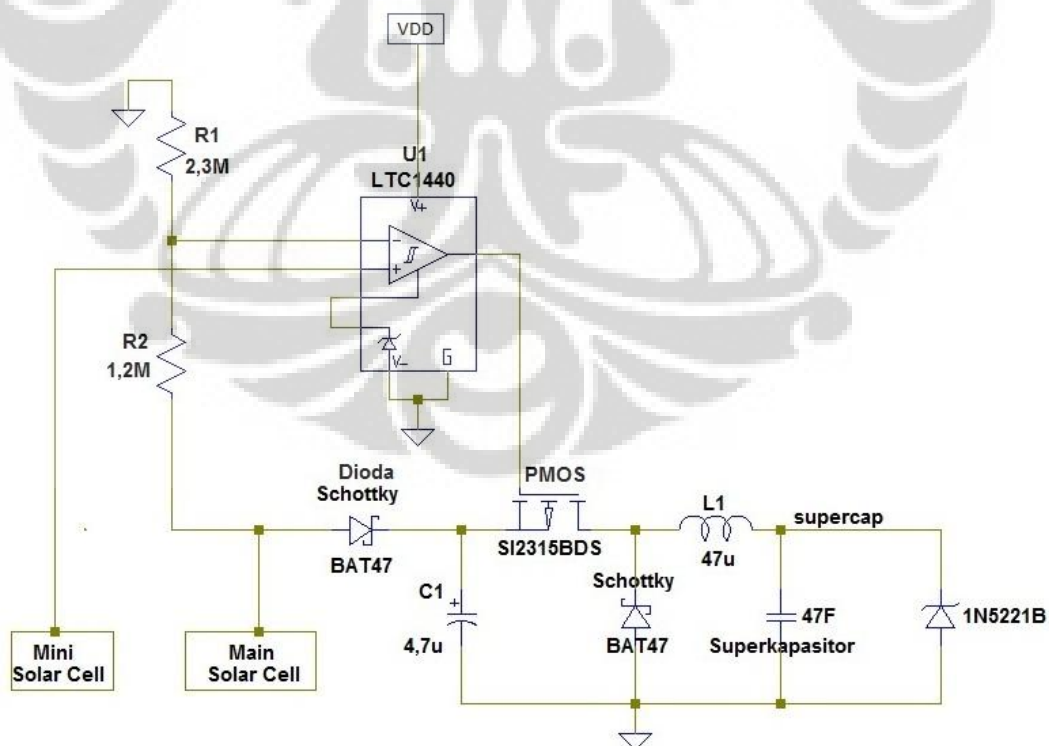
#### 3.1 Rangkaian *Input*

Bagian utama dari rangkaian *input* adalah rangkaian *maximum power point tracker* (MPPT). Rangkaian MPPT berfungsi untuk membuat sel surya bekerja pada titik daya maksimumnya, sehingga sel surya dapat mengirimkan daya maksimum yang tersedia. Rangkaian MPPT yang digunakan pada modul ini, yaitu

MPPT yang berdasarkan pada konverter *buck*. Tidak seperti pada konverter *buck* yang tegangan *output* nya dibuat konstan, rangkaian ini berfungsi menjaga tegangan *input* agar tetap konstan pada titik daya maksimumnya. Rangkaian MPPT dapat dilihat pada Gambar 3.2. Rangkaian MPPT ini merupakan kombinasi antara konverter *buck* dan komparator digital (LTC1440). Tegangan sel surya utama dihubungkan dengan salah satu *input* komparator melalui *voltage divider*. *Input* komparator lain dihubungkan dengan sel surya kecil yang berfungsi sebagai sensor *irradiance*. Penggunaan sel surya kecil sebagai sensor *irradiance* adalah karena hubungan antara tegangan rangkaian terbuka sel surya kecil dan sel surya utama adalah mendekati linier. Oleh karena itu, hubungan antara tegangan rangkaian terbuka sel surya kecil dan tegangan sel surya utama pada saat daya maksimum juga mendekati linier (Persamaan 3.1)[7]. Dengan adanya sel surya kecil ini, sel surya utama dipaksa bekerja pada tegangan saat daya yang dihasilkannya maksimum

$$V_{MPP} \approx V_{OC} \cdot k_{MPP}$$

$$\approx V_{OC, mini} \cdot k_{mini} \cdot k_{MPP} \quad (3.1)$$



Gambar 3.2 Rangkaian *input* dengan MPPT

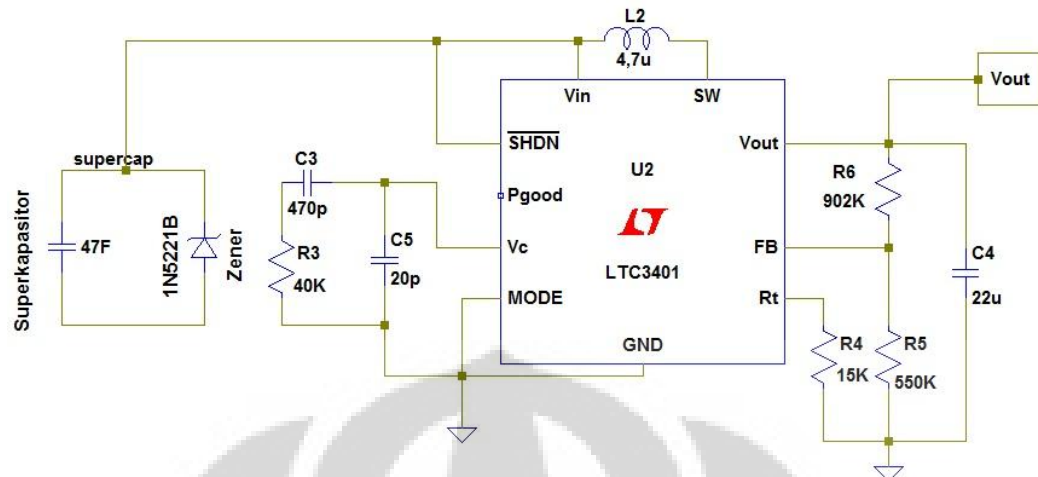
Untuk mendapatkan  $V_{MPP}$  sel surya utama, pemilihan nilai-nilai resistor untuk *voltage divider* harus tepat.

Dari Gambar 3.2 terlihat bahwa terdapat dioda schottky yang dipasang diantara sel surya dan rangkaian MPPT. Dioda ini berfungsi untuk mencegah arus mengalir menuju sel surya ketika tegangan super kapasitor lebih tinggi dari tegangan sel surya. Biasanya hal ini terjadi ketika intensitas cahaya matahari kurang. Selain dioda schottky, pada rangkaian juga terdapat dioda zener. Dioda zener berfungsi untuk melindungi super kapasitor agar tidak *overcharge*. Zener yang digunakan adalah zener dengan tegangan *breakdown* yang mendekati tegangan maksimum super kapasitor. Super kapasitor yang digunakan sebagai *energy buffer* adalah super kapasitor dengan kapasitas 47 farad dan tegangan maksimum 2,7 volt.

Pada dasarnya, rangkaian MPPT ini membuat sel surya bekerja pada titik daya maksimumnya, kemudian daya/tegangan yang dikirimkan sel surya itu digunakan untuk mengisi superkapasitor dan sebagai *input* pada rangkaian *output*.

### 3.2 Rangkaian *output*

Pada dasarnya, rangkaian *output* dari alat ini adalah sebuah regulator *step-up* DC/DC. *Embedded system* atau *sensor node*, membutuhkan tegangan stabil untuk dapat bekerja dengan baik. Regulator DC/DC yang digunakan adalah LTC3401 dari *Linear Technology*. Regulator ini merupakan regulator *step-up* yang dapat menyediakan tegangan stabil 3,3 volt meskipun dengan *input* yang rendah dan tidak stabil. Rangkaian *output* alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.3. Komponen-komponen yang dihubungkan dengan IC merupakan bagian dasar dari IC tersebut untuk menghasilkan tegangan stabil 3,3 volt. Nilai dari komponen-komponen tersebut dapat diketahui dari *datasheet*, *application note*, atau *design note* dari *Linear Technology*[17].



Gambar 3.3 Rangkaian *output*

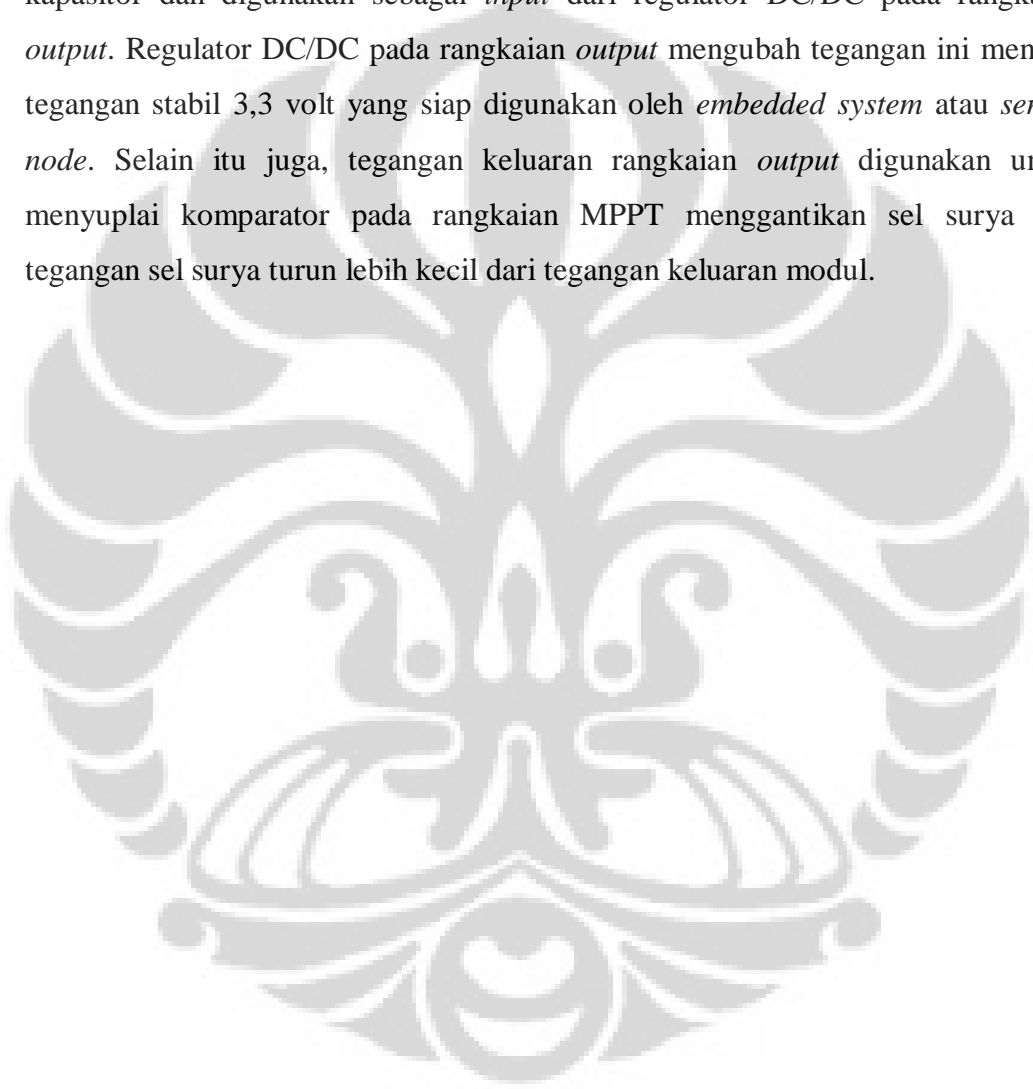
Rangkaian *output* ini pada dasarnya adalah untuk mengubah tegangan sel surya saat daya maksimum  $V_{MPP}$  menjadi tegangan stabil 3,3 volt yang diperlukan untuk menjalankan *embedded system/sensor node*.

### 3.3 Rangkaian Modul Penyuplai Daya Dengan Memanfaatkan Energi Matahari

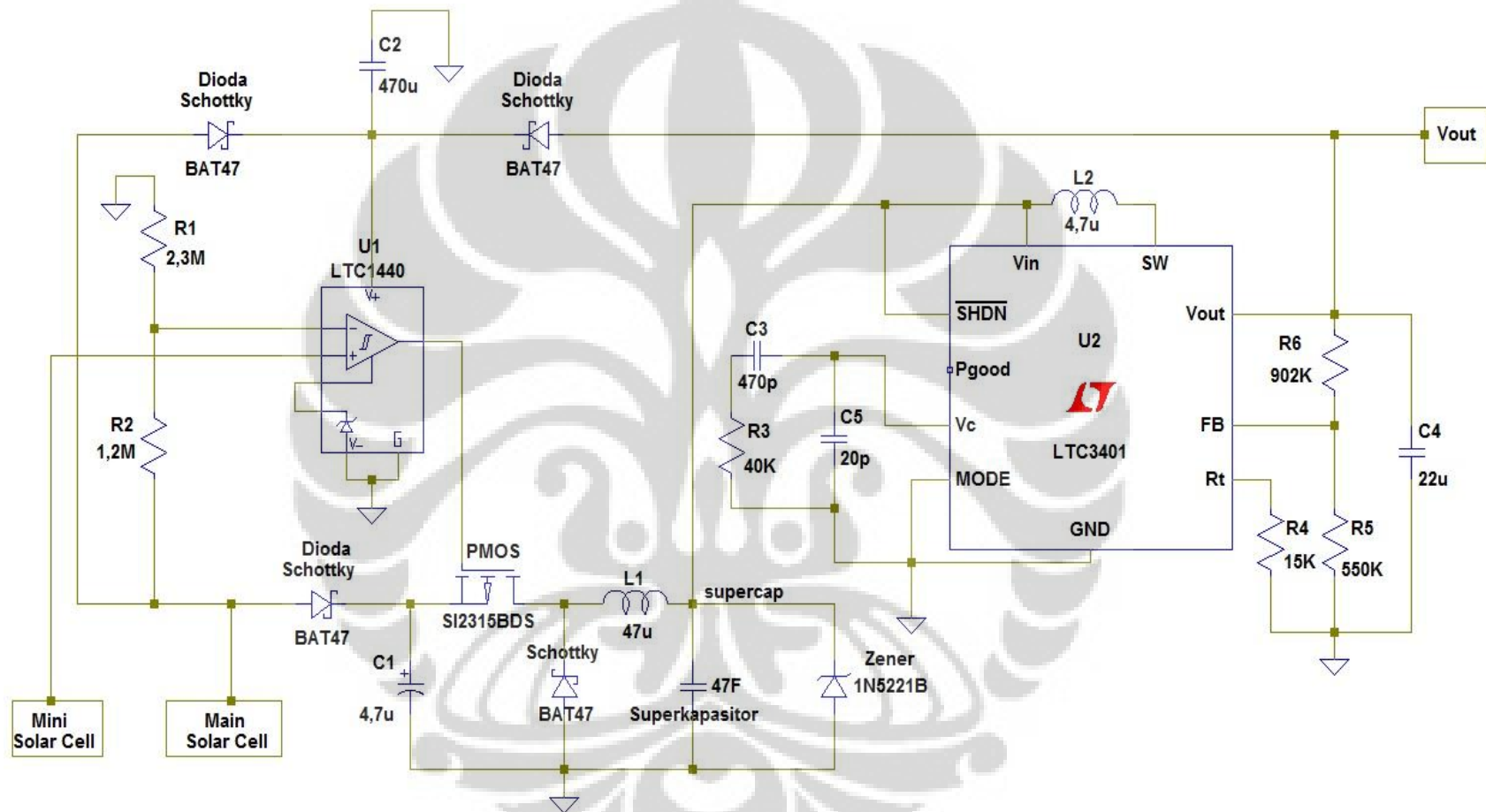
Rangkaian lengkap dari modul penyuplai daya ini dapat dilihat pada Gambar 3.4. Pada Gambar 3.4 dapat dilihat bahwa selain rangkaian *input* dan *output*, terdapat rangkaian lain yang terdiri dari dioda schottky (BAT47) dan kapasitor. Rangkaian ini berfungsi sebagai *power supply* untuk komparator. Komparator bisa memperoleh suplai dari rangkaian *output* maupun dari sel surya, tergantung tegangan mana yang lebih besar. Ketika tegangan *output* regulator DC/DC lebih kecil dari tegangan sel surya, komparator akan disuplai oleh sel surya. Ketika tegangan *output* regulator lebih besar dari tegangan sel surya, misalnya dalam keadaan dengan intensitas cahaya matahari rendah, komparator dapat disuplai oleh regulator DC/DC. Dengan konfigurasi seperti ini, rangkaian MPPT dapat terus bekerja. Gambar 3.5 pada Lampiran 1 menunjukkan gambar modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari.

Berikut ini akan dijelaskan secara singkat mengenai cara kerja modul. Ketika sel surya terkena cahaya matahari, sel surya membangkitkan tegangan dan arus. Tegangan sel surya ini kemudian diatur sedemikian rupa oleh rangkaian

MPPT (yang juga disuplai oleh sel surya), sehingga tegangan ini nilainya sama dengan tegangan ketika sel surya berada pada titik daya maksimumnya ( $V_{MPP}$ ). Kemudian, tegangan ini ( $V_{MPP}$ ) diturunkan melalui konverter buck. Tegangan sel surya perlu diturunkan karena sel surya menghasilkan tegangan sekitar 4,65 volt, sedangkan tegangan maksimum super kapasitor yang digunakan adalah 2,7 volt. Selanjutnya, tegangan yang sudah diturunkan ini digunakan untuk mengisi super kapasitor dan digunakan sebagai *input* dari regulator DC/DC pada rangkaian *output*. Regulator DC/DC pada rangkaian *output* mengubah tegangan ini menjadi tegangan stabil 3,3 volt yang siap digunakan oleh *embedded system* atau *sensor node*. Selain itu juga, tegangan keluaran rangkaian *output* digunakan untuk menyuplai komparator pada rangkaian MPPT menggantikan sel surya jika tegangan sel surya turun lebih kecil dari tegangan keluaran modul.







Gambar 3.4 Rangkaian modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari

## BAB 4

### UJI COBA DAN ANALISIS

#### 4.1 Simulasi

Sebelum rangkaian modul penyuplai daya ini dibuat, perlu dilakukan simulasi terlebih dahulu untuk melihat apakah hasilnya sesuai dengan yang diinginkan. Simulasi pertama adalah untuk melihat bagaimana karakteristik sel surya utama dan mini sel surya. Untuk sel surya utama dan mini sel surya, dari hasil pengukuran didapatkan hasil sebagai berikut.

Intensitas cahaya matahari: 113400 Lux

Sel surya utama:  $V_{oc} = 6,22 \text{ V}$

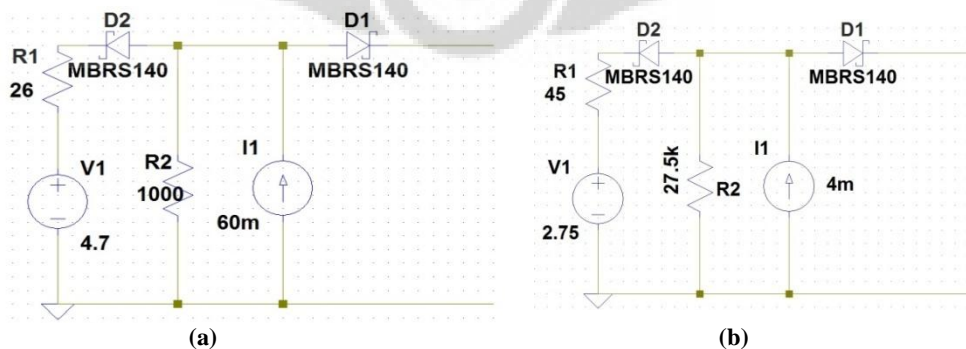
$I_{sc} = 60,3 \text{ mA}$

Mini sel surya:  $V_{oc} = 3,088 \text{ V}$

$I_{sc} = 4 \text{ mA}$

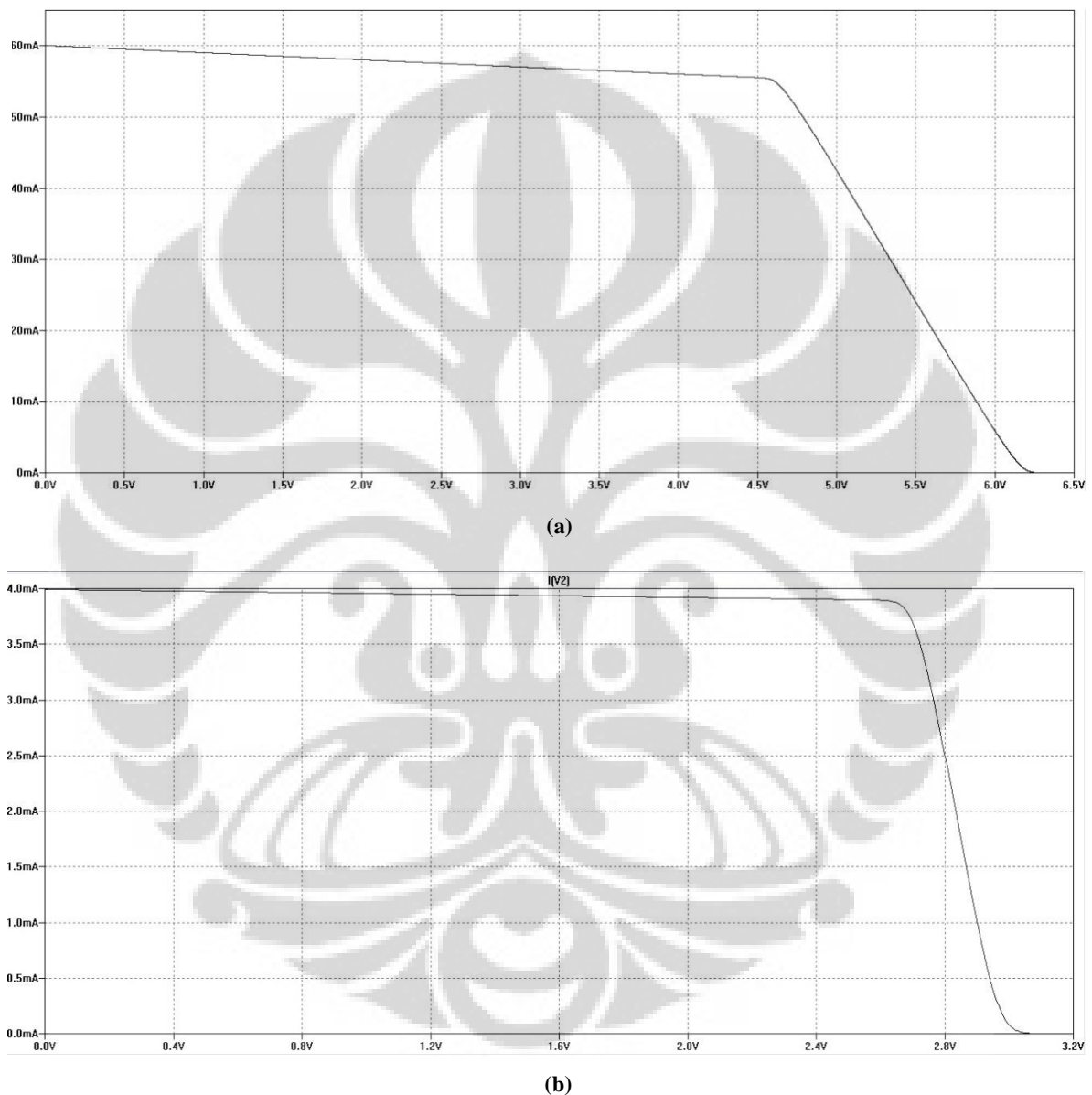
Dari data tersebut akan disimulasikan karakteristik sel surya terhadap perubahan beban. Menurut hasil penelitian, nilai tegangan saat daya maksimum  $V_{mpp}$  untuk sel surya berada dalam rentang 0,71 hingga 0,78 kali dari tegangan hubung terbukanya  $V_{oc}$  [8]. Dari data tersebut, untuk sel surya utama, nilai tegangan saat daya maksimumnya  $V_{mpp}$  ditentukan sebesar 0,75 kali dari tegangan hubung terbukanya  $V_{oc}$ .

Gambar rangkaian ganti untuk sel surya utama dapat dilihat pada Gambar 4.1a, sedangkan untuk mini sel surya dapat dilihat pada Gambar 4.1b.



Gambar 4.1 a) Rangkaian ganti sel surya utama. b) Rangkaian ganti mini sel surya

Untuk hasil simulasinya sendiri dapat dilihat pada Gambar 4.2a untuk sel surya utama dan 4.2b untuk mini sel surya. Hasil simulasi ini adalah simulasi karakteristik sel surya dengan intensitas cahaya matahari konstan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* LTSpice dari *Linear Technology*.



Gambar 4.2 a) Hasil simulasi sel surya utama. b) Hasil simulasi mini sel surya

Gambar 4.3 menunjukkan rangkaian lengkap modul yang disimulasikan (lihat Lampiran 2). Pada rangkaian simulasi, beban yaitu *sensor node* IEEE

802.15.4/Zigbee, diganti dengan resistor. Nilai resistor ini dapat dicari dengan menggunakan data spesifikasi *sensor node* IEEE 802.15.4/Zigbee dalam keadaan aktif, yaitu tegangan kerja 3,3V dan konsumsi daya 50mW[8]. Nilai resistor pengganti dapat dicari dengan,

$$R_p = V^2 / P$$

$$R_p = 3,3^2 / 50m$$

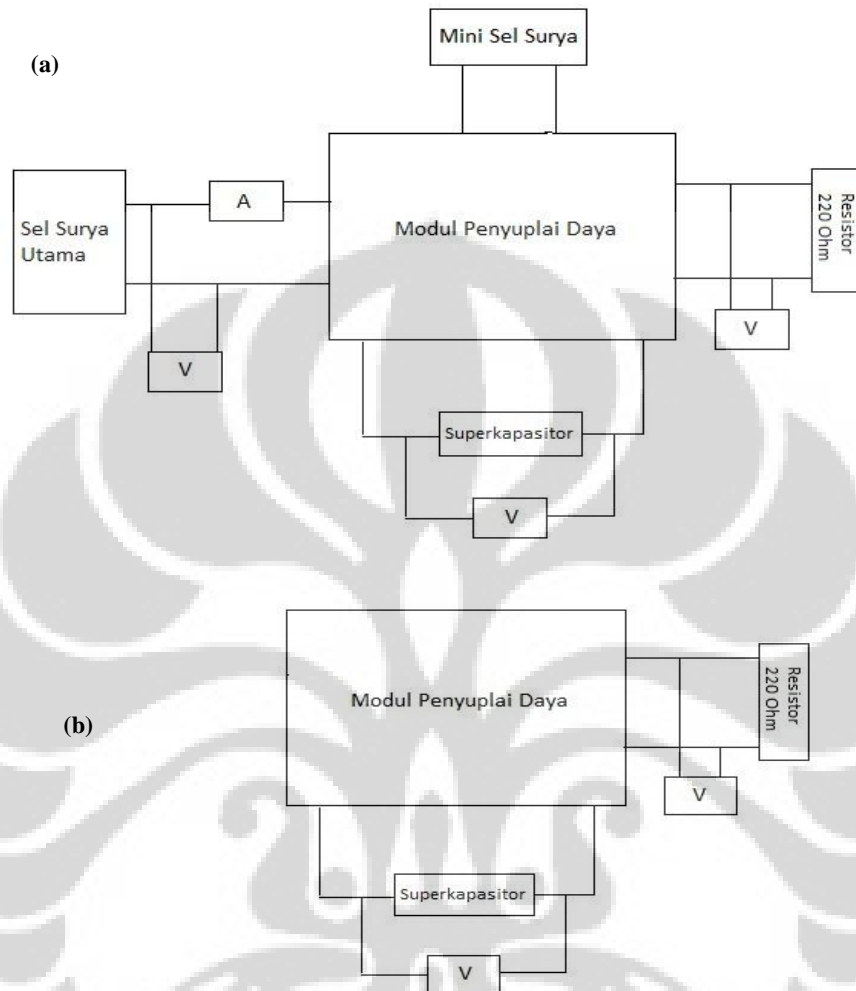
$$R_p = 217,8 \text{ Ohm} \sim 220 \text{ Ohm}$$

Gambar 4.4 menunjukkan grafik keluaran hasil simulasi (lihat Lampiran3). Dari hasil simulasi pada Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa tegangan *output* modul, yaitu stabil sebesar 3,3 volt. Tegangan stabil 3,3 volt didapat karena pada rangkaian ini menggunakan IC LTC3401 dari *Linear Technology* yang merupakan *step up DC-DC Converter*. Hasil ini sudah sesuai dengan hasil yang diinginkan, yaitu tegangan kerja *sensor node* sebesar 3,3 volt. Untuk tegangan superkapasitor sendiri, yaitu sebesar 2,07 volt. Nilai tegangan ini masih di bawah nilai tegangan batas superkapasitor, yaitu 2,7 volt, sehingga penggunaan superkapasitor sebagai *energy buffer* tidak ada masalah. Nilai tegangan superkapasitor tidak melebihi 2,7volt diakibatkan oleh penggunaan dioda zener. Dioda zener yang digunakan untuk simulasi ini mempunyai tegangan *breakdown* sebesar 2,059 volt. Zener disini berfungsi untuk mencegah tegangan superkapasitor agar tidak melebihi tegangan batasnya.

#### 4.2 Uji Coba

Untuk memverifikasi bahwa modul penyuplai daya untuk *sensor node* ini bekerja atau tidak, maka dilakukan uji coba. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan keluaran yang dihasilkan modul apakah sesuai dengan kebutuhan *sensor node* atau tidak, yaitu sebesar 3,3 volt. Uji coba dilakukan untuk tiga keadaan, yaitu tanpa beban, dengan beban, dan tanpa sel surya ketika tegangan super kapasitor sudah penuh. Untuk *sensor nodenya* sendiri diganti dengan sebuah resistor dengan nilai resistansi sebesar 220 ohm. Dengan nilai resistansi tersebut, daya yang dihantarkan ke resistor sama dengan daya kebutuhan *sensor node* dalam keadaan aktif, yaitu sebesar ~50mW. Gambar 4.5a dan 4.5b menunjukkan

gambar blok diagram uji coba. Data hasil uji coba dapat dilihat pada tabel yang terdapat pada lampiran.



Gambar 4.5 a) Gambar blok diagram uji coba lengkap  
b) Gambar blok diagram uji coba tanpa sel surya

### Uji coba tanpa beban

Uji coba tanpa beban dilakukan sebanyak tiga kali. Tabel 4.1a, Tabel 4.1b, dan Tabel 4.1c (lihat Lampiran 4) menunjukkan data untuk uji coba dalam keadaan tanpa beban.

Dari masing-masing data uji coba tersebut akan dibuat grafik. Grafik dibuat agar dapat melihat dengan jelas berapa lama superkapasitor dapat penuh dan ketika tegangan superkapasitor berapakah tegangan *output* dapat mencapai

nilai 3,3 volt. Sebelumnya, harus diketahui dulu berapa nilai rata-rata untuk intensitas cahaya matahari, arus sel surya, dan tegangan yang dihasilkan sel surya. Nilai rata-rata dapat ditentukan dengan menjumlahkan nilai setiap data dan dibagi dengan banyaknya data tersebut. dengan menggunakan cara itu, kita bisa mendapatkan nilai rata-rata intensitas cahaya matahari, arus sel surya  $I_s$  dan tegangan sel surya  $V_s$ .

Untuk uji coba 1 tanpa beban,

rata-rata intensitas = 99747 lux

rata-rata  $I_s$  = 48,62 mA

rata-rata  $V_s$  = 4,68 Volt

Untuk uji coba 2 tanpa beban,

rata-rata intensitas = 89152 lux

rata-rata  $I_s$  = 42,17 mA

rata-rata  $V_s$  = 4,65 Volt

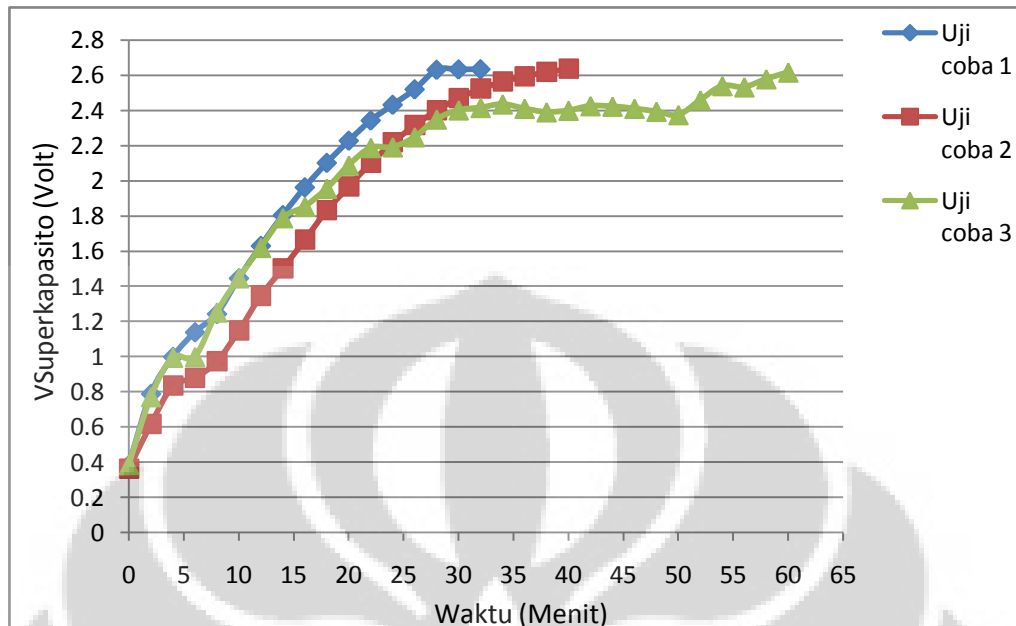
Untuk uji coba 3 tanpa beban,

rata-rata intensitas = 66664 lux

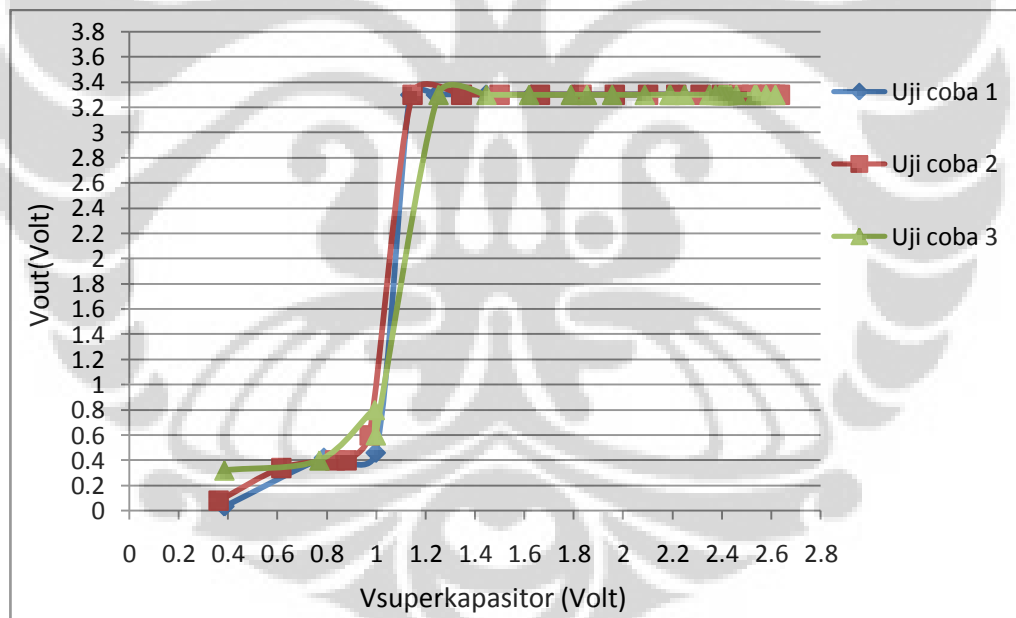
rata-rata  $I_s$  = 32,08 mA

rata-rata  $V_s$  = 4,58 Volt

Grafik yang dibuat adalah grafik antara tegangan superkapasitor dengan waktu dan antara tegangan superkapasitor dengan tegangan *output*. Masing-masing dengan nilai rata-rata intensitas cahaya matahari, arus, dan tegangan sel surya. Gambar 4.6a menunjukkan grafik antara tegangan super kapasitor dan waktu, Gambar 4.6b menunjukkan grafik antara tegangan superkapasitor dan tegangan *output* modul.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Grafik untuk uji coba tanpa beban. a) Grafik antara waktu dan tegangan super kapasitor. b) Grafik antara tegangan superkapasitor dan tegangan *output*

Dari uji coba 1 terlihat bahwa super kapasitor penuh dalam waktu 32 menit. Untuk uji coba 2 super kapasitor penuh dalam waktu 40 menit. Untuk uji coba 3 superkapasitor penuh dalam waktu 60 menit. Perbedaan kecepatan

*charging* dari super kapasitor ini adalah karena rata-rata intensitas cahaya matahari yang mengenai sel surya berbeda-beda. Untuk uji coba 1 rata-rata intensitas cahaya matahari lebih besar dari uji coba 2 dan uji coba 3. Oleh karena itu, pada uji coba 1 super kapasitor penuh lebih cepat dari uji coba 2 dan uji coba 3. Untuk uji coba 3 yang rata-rata intensitas cahaya matahari paling kecil, super kapasitor baru penuh pada menit ke 60, kecepatan *charging*nya paling lama dibandingkan dengan uji coba 1 dan uji coba 2. Kecepatan *charging* super kapasitor sebenarnya dipengaruhi oleh arus dan tegangan yang ditransfer oleh sel surya. Besarnya nilai arus dan tegangan sel surya dipengaruhi oleh nilai intensitas cahaya matahari, sehingga kecepatan *charging* super kapasitor juga dipengaruhi oleh besarnya intensitas cahaya matahari. Dari data didapat bahwa semakin besar nilai intensitas cahaya matahari, nilai arus dan tegangan juga semakin besar. Jadi, semakin besar intensitas cahaya matahari, semakin cepat juga waktu *charging* dari super kapasitornya. Dari grafik pada Gambar 4.6a semakin terlihat jelas bahwa makin besar nilai intensitas cahaya matahari, makin cepat juga tegangan superkapasitor mencapai puncaknya. Semakin besar intensitas cahaya matahari, semakin cepat tegangan super kapasitor mencapai nilai tertentu.

Untuk hubungan antara tegangan super kapasitor dan tegangan *output* modul penyuplai daya ini, tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya intensitas cahaya matahari. Dari data yang didapat, untuk uji coba 1, uji coba 2, dan uji coba 3, ketika tegangan super kapasitor sudah mencapai nilai sekitar 1,15 volt; tegangan *output* sudah bisa berada pada nilai 3,3 volt. Hal ini memang terjadi karena yang membuat tegangan *output* naik ke nilai 3,3 volt adalah level tegangan super kapasitornya saja. Berapapun nilai intensitas cahaya matahari, selama tegangan super kapasitor belum mencapai tegangan tertentu (dalam uji coba ini, yaitu 1,15 volt), tegangan *output* tidak akan naik ke nilai 3,3 volt. Ini merupakan hasil dari pemakaian konverter DC/DC *step-up* LTC3401. Dengan konfigurasi seperti pada Gambar 3.3, konverter ini akan menghasilkan tegangan *output* sebesar 3,3 volt ketika tegangan *input* konverternya berada pada level sekitar 1 volt. Dari grafik pada Gambar 4.6b terlihat untuk uji coba 1, uji coba 2, dan uji coba 3 dengan intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda, tegangan *output* mencapai nilai 3,3



volt dengan tegangan super kapasitor yang hampir sama. Oleh karena itu, grafik yang terbentuk untuk uji coba 1, uji coba 2, dan uji coba 3 terlihat berimpit.

Untuk masalah tegangan *output* modul, yang membedakan ketiga uji coba ini adalah lamanya modul penyuplai daya ini menghasilkan tegangan output sebesar 3,3 volt. Untuk uji coba 1, pada menit ke 6, tegangan *output* sudah mencapai nilai 3,3 volt. Untuk uji coba 2, tegangan *output* sebesar 3,3 volt didapat dalam waktu 10 menit, dan 8 menit untuk uji coba 3.

Uji coba tanpa beban juga dapat dianggap mewakili untuk penggunaan pada *sensor node* ketika sensor node dalam keadaan tidak aktif atau *sleep*, karena pada saat *sleep*, *sensor node* mengkonsumsi daya yang sangat kecil, yaitu hanya ~1mW saja[8].

### Uji coba dengan beban

Untuk uji coba ini, beban, yaitu *sensor node* diganti dengan sebuah resistor 220 ohm. Nilai resistor ini digunakan sehingga dengan tegangan 3,3 volt, daya disipasi di resistor sebesar ~50 mW, yaitu sama dengan daya yang dikonsumsi oleh *sensor node* dalam keadaan aktif. Uji coba dilakukan dua kali, yaitu yang pertama beban diberikan sejak awal ketika tegangan superkapasitor sebesar 0,48 volt. Uji coba kedua dilakukan ketika tegangan super kapasitor nilainya 1,3 volt.

Tabel 4.2a pada Lampiran 5 menunjukkan data uji coba dengan beban dan Tabel 4.2b menunjukkan data uji coba dengan beban ketika tegangan super kapasitor sebesar 1,3 volt.

Sama dengan pada uji coba tanpa beban, nilai rata-rata untuk intensitas cahaya matahari, arus sel surya, dan tegangan sel surya didapat dengan Persamaan 4.1.

Uji coba 1 dengan beban 220ohm,

$$\text{rata-rata intensitas} = 101884 \text{ lux}$$

$$\text{rata-rata } I_s = 46,64 \text{ mA}$$

$$\text{rata-rata } V_s = 5,08 \text{ Volt}$$

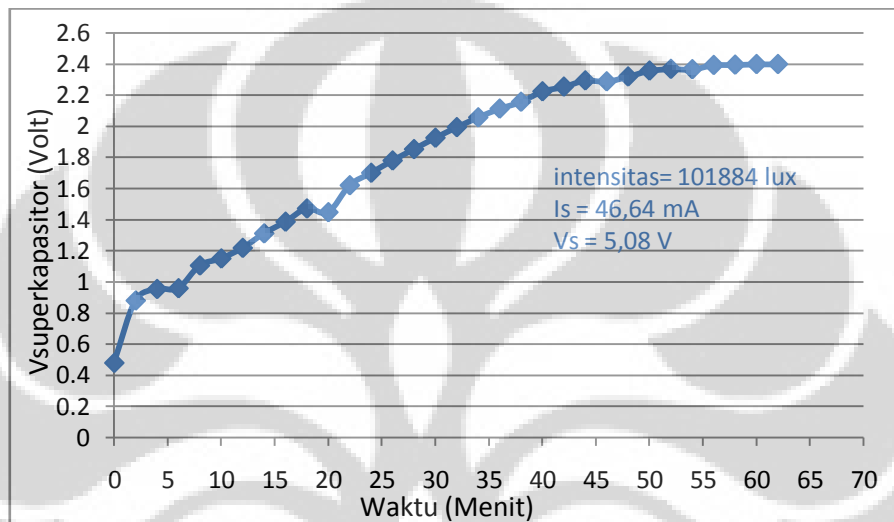
Uji coba 2 dengan beban 220ohm, tegangan awal super kapasitor  $V_{sk}=1,3V$

rata-rata intensitas = 105482 lux

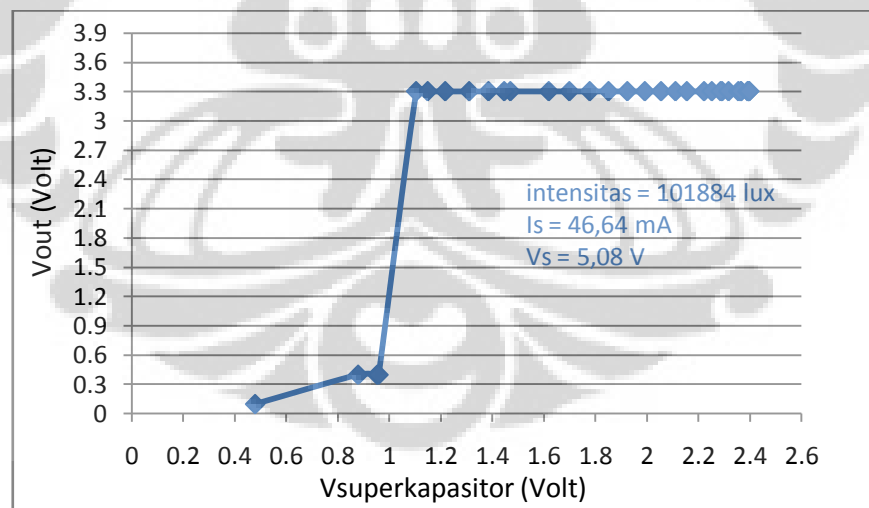
rata-rata  $I_s = 49,76 \text{ mA}$

rata-rata  $V_s = 4,72 \text{ Volt}$

Dari Tabel 4.2 juga akan dibuat grafik. Grafik untuk uji coba 1 dengan beban ditunjukkan pada Gambar 4.7. Grafik untuk uji coba 2 dengan beban ditunjukkan pada Gambar 4.8.



(a)



(b)

**Gambar 4.7** Grafik untuk uji coba 1 dengan beban. a) Grafik antara waktu dan tegangan super kapasitor. b) Grafik antara tegangan superkapasitor dan tegangan output

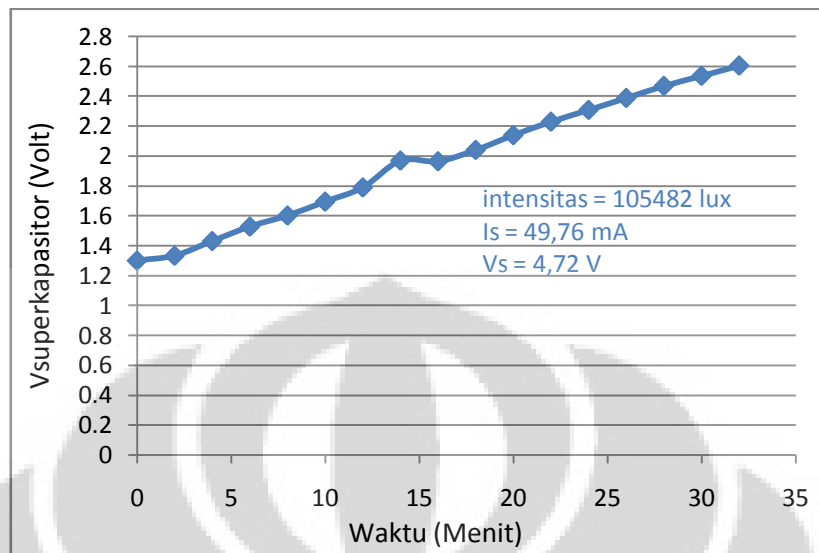
Untuk uji coba pertama, didapat nilai rata-rata intensitas = 101884 lux, arus sel surya  $I_s = 46,64 \text{ mA}$ ; dan tegangan sel surya  $V_s = 5,08 \text{ volt}$ . Dengan

kondisi seperti itu, didapatkan berapa lama waktu *charging* dari super kapasitor. Dari data terlihat bahwa untuk mendapatkan tegangan superkapasitor sebesar 2,398volt, dibutuhkan waktu selama 62 menit. Untuk tegangan *output* modulnya sendiri, nilai 3,3 volt didapatkan ketika tegangan superkapasitor sebesar 1,105 volt. Seperti dibahas sebelumnya bahwa tegangan *output* modul akan mulai naik ke nilai 3,3 volt ketika tegangan super kapasitor sudah mencapai nilai sekitar 1volt. Hal ini karena penggunaan konverter DC/DC. Dari grafik terlihat jelas bahwa sebelum tegangan super kapasitor mencapai 1,105V, tegangan *output* masih berada pada level 0,4 volt. Setelah tegangan mencapai 1,105 volt dan terus naik, tegangan *output* langsung naik mencapai 3,3 volt seperti yang ditunjukkan grafik pada Gambar 4.7b.

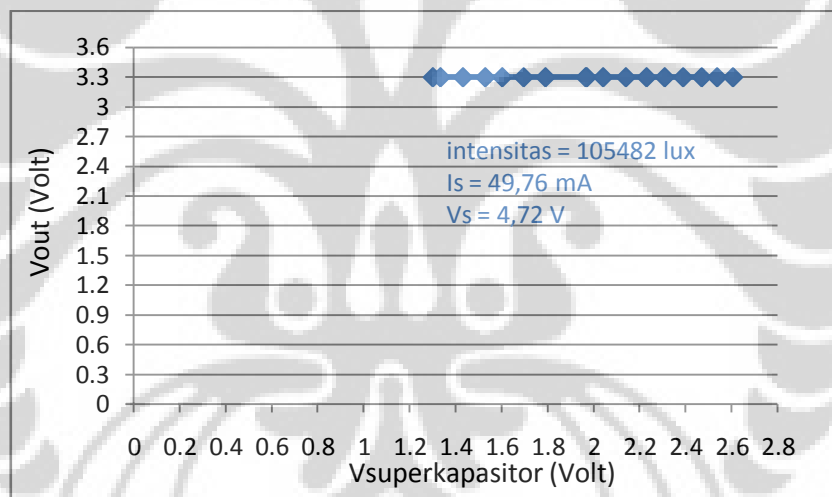
Uji coba 2 dengan beban dilakukan ketika tegangan superkapasitor sudah bernilai 1,3 volt. Ini artinya tegangan *output* pada awal uji coba harus sudah bernilai 3,3 volt. Hal ini diverifikasi oleh data yang didapat. Dapat dilihat dari Tabel 4.2b atau grafik pada Gambar 4.8b. Dari 1,3 volt, tegangan superkapasitor terus naik hingga mencapai 2,606 volt. Untuk mencapai tegangan 2,606 volt dari tegangan awal 1,3 volt dibutuhkan waktu selama 32 menit.

Pada kedua uji coba ini, dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.8, bahwa meskipun modul ini diberi beban, nilai tegangan super kapasitor tetap naik. Hal ini berarti daya yang dikirimkan oleh sel surya, selain untuk menyuplai beban juga digunakan untuk mengisi super kapasitor. Ini juga berarti bahwa daya yang dihasilkan sel surya lebih besar dari daya yang dikonsumsi oleh beban. dapat dilihat juga dari data, daya yang dihasilkan oleh sel surya untuk uji coba 1 dengan beban adalah sebesar  $V_s \times I_s$ , yaitu  $P_s = 236,93$  mW, sedangkan konsumsi beban sendiri sebesar  $\sim 50$  mW, maka jelaslah bahwa tegangan superkapasitor tetap naik meskipun modul diberi beban.

Uji coba ini juga membuktikan bahwa modul penyuplai daya ini memang dapat digunakan untuk menyuplai daya pada *senor node* karena dengan dibebani 220 ohm, masih dapat menghasilkan tegangan *output* stabil sebesar 3,3 volt yang artinya modul ini menyuplai daya untuk resistor sebesar  $\sim 50$  mW. Dan selama masih ada cahaya matahari, modul akan dapat menyuplai *sensor node*.



(a)



(b)

Gambar 4.8 Grafik untuk uji coba 2 dengan beban. a) Grafik antara waktu dan tegangan super kapasitor. b) Grafik antara tegangan superkapasitor dan tegangan output

Jika membandingkan antara uji coba tanpa beban dan uji coba dengan beban, maka yang terlihat jelas adalah lamanya waktu *charging* dari super kapasitor. Ambil satu contoh, yaitu uji coba 1 tanpa beban dengan kondisi,

rata-rata intensitas = 99747 lux

rata-rata  $I_s = 48,62$  mA

rata-rata  $V_s = 4,68$  Volt

jika kita bandingkan dengan uji coba 1 dengan beban dengan kondisi,

rata-rata intensitas = 101884 lux

rata-rata  $I_s = 46,64$  mA

rata-rata  $V_s = 5,08$  Volt

dari tabel maupun grafik terlihat bahwa meskipun intensitas cahaya matahari untuk uji coba tanpa beban lebih tinggi, tetapi kecepatan *charging* untuk tanpa beban tetap lebih cepat dari kecepatan *charging* dengan beban, yaitu 32 menit untuk tanpa beban dan 62 menit untuk dengan beban. Seperti sudah disebutkan sebelumnya, hal ini terjadi karena selain disimpan di super kapasitor, untuk uji coba dengan beban, daya juga dikirimkan ke beban sehingga daya yang masuk ke super kapasitor itu lebih sedikit yang membuat kenaikan tegangan super kapasitor lebih lama. Untuk tegangan *output* modulnya sendiri, tidak ada perbedaan. Tegangan *output* akan mencapai 3,3 volt pada kedua uji coba ketika tegangan super kapasitor sudah melebihi 1 volt.

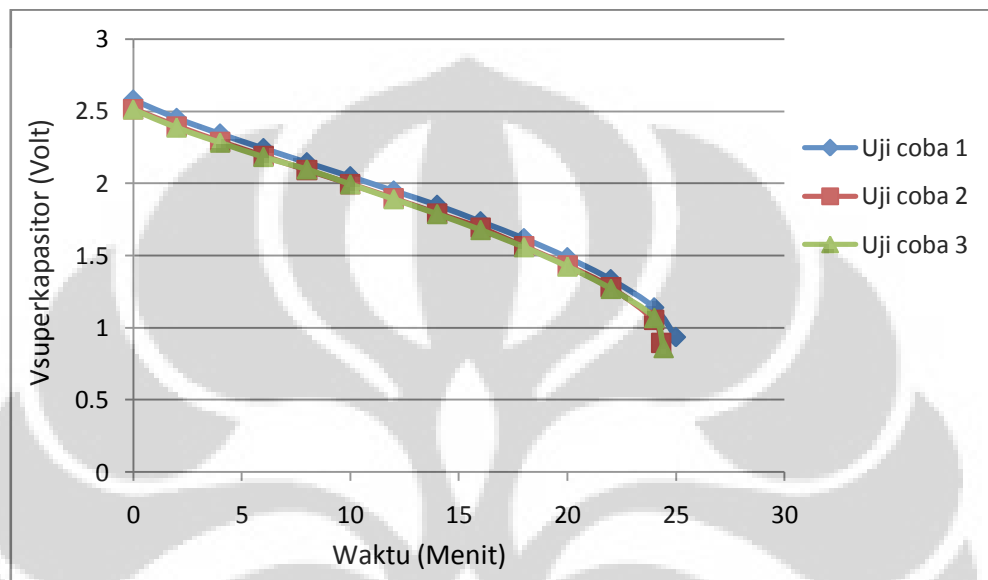
### **Uji coba dengan beban tanpa sel surya ketika tegangan super kapsitor sudah penuh**

Tabel 4.3a, Tabel 4.3b, dan Tabel 4.3c pada Lampiran 6 menunjukkan data uji coba dengan beban 220 ohm ketika tegangan superkapasitor sudah terisi penuh dan modul tidak dihubungkan dengan sel surya. Uji coba ini bertujuan untuk mengetahui berapa lama superkapasitor dapat bertahan jika sel surya tidak terkena sinar matahari (dalam keadaan malam hari).

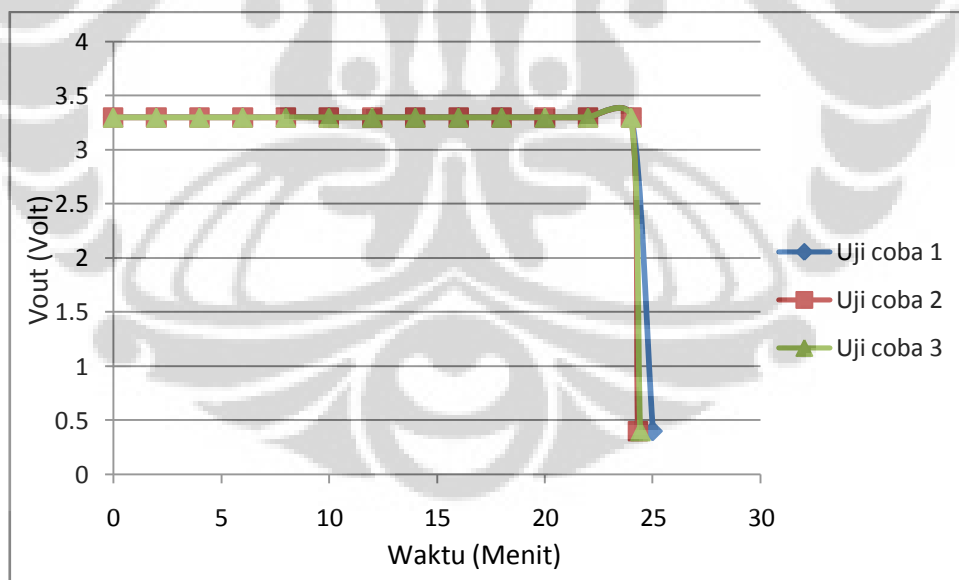
Dari Tabel 4.3 akan dibuat grafik. Grafik pada Gambar 4.9a menunjukkan hubungan antara tegangan super kapasitor dan waktu untuk masing-masing uji coba. Grafik pada Gambar 4.9b menunjukkan hubungan antara tegangan *output* dan waktu untuk masing-masing uji coba.

Uji coba dilakukan tiga kali. Tujuan dari uji coba ini adalah untuk mengetahui berapa lama superkapasitor dapat bertahan dalam keadaan tanpa matahari (malam hari). Data hasil uji coba dapat dilihat pada Tabel 4.3 di Lampiran 6. Dari hasil itu, untuk ketiga uji coba, didapatkan rata-rata bahwa superkapasitor bertahan selama 24 menit untuk beban 220 ohm. Ini artinya dengan

konsumsi daya sebesar ~50 mW, modul hanya mampu menyuplai beban selama 24 menit saja. Setelah itu tegangan superkapasitor akan jatuh ke level 0,9 volt; sehingga tegangan *output* modul tidak lagi 3,3 volt, tetapi hanya 0,4 volt saja. Pada kondisi ini, modul tidak dapat menyuplai beban lagi. Grafik antara ketiga uji coba itu berimpit, hal ini berarti modul penyuplai daya ini konsisten.



a



b

Gambar 4.9 Grafik untuk uji coba dengan beban tanpa sel surya. a) Grafik antara waktu dan tegangan super kapasitor. b) Grafik antara waktu dan tegangan output

Dari hasil simulasi dan uji coba terdapat perbedaan. Pertama, yaitu tegangan sel surya. Pada simulasi, tegangan sel surya terlihat berosilasi sedangkan dari hasil uji coba dengan menggunakan alat ukur digital, didapatkan satu nilai untuk tegangan sel surya. Sebenarnya, tegangan sel surya memang harusnya berosilasi. Hal ini diakibatkan oleh kapasitor *input* dan induktor yang ada pada rangkaian konverter *buck* yang merupakan bagian dari rangkaian MPPT. Adapun hasil pengukuran yang hanya memberikan satu nilai, disebabkan karena alat ukur yang digunakan, sehingga yang diambil hanyalah nilai rms dari tegangan yang berosilasi tersebut. Untuk hasil pengukuran menggunakan osiloskop, memang terlihat bahwa tegangan di *node* sel surya berosilasi, tetapi untuk pengukuran dengan osiloskop, sel surya diganti dengan sumber tegangan yang konstan.

Kedua, *charging time* super kapasitor di simulasi tidak terlihat. Kemungkinan hal ini terjadi karena model super kapasitor yang dipakai di simulasi adalah bukan model untuk super kapasitor sebenarnya. Pada simulasi, model super kapasitor yang dipakai sama dengan kapasitor biasa, hanya nilai kapasitansinya saja yang dinaikkan.

Ketiga, tegangan maksimum super kapasitor pada simulasi nilainya hanya 2,07 volt, sedangkan aslinya, tegangan super kapasitor mencapai 2,6 volt. Hal ini disebabkan karena diode zener yang digunakan pada simulasi memiliki tegangan *breakdown* sebesar 2,059 volt, sedangkan yang digunakan pada alat sebenarnya adalah 2,4 volt. Penggunaan model zener pada simulasi dipilih karena model simulasi untuk diode zener yang dipakai tidak ada. Akan tetapi, yang ingin ditunjukkan disini adalah bahwa dengan menggunakan diode zener, dapat melindungi super kapasitor agar tidak *overcharge*. Terlihat dari hasil simulasi dan uji coba bahwa tegangan super kapasitor tidak melebihi tegangan maksimumnya yaitu sebesar 2,7 volt.

Selain tiga perbedaan tersebut, hasil dari simulasi dan uji coba menunjukkan bahwa modul penyuplai daya ini memang dapat digunakan untuk menyuplai *sensor node* dengan tegangan kerja 3,3 volt dan konsumsi daya saat aktif sebesar ~50mW.

Asumsikan *sensor node* bekerja tanpa matahari selama 14 jam dan *sensor node* mempunyai *duty cycle* sebesar 1/60, artinya bahwa satu menit *sensor node* itu aktif dan 59 menit *sensor node* itu *sleep*. Jika seperti itu, secara keseluruhan *sensor node* akan aktif selama 14 menit ketika 14 jam tidak terkena matahari. Dengan demikian, jika tidak memperhitungkan konsumsi daya selama *sensor node sleep*, penggunaan superkapasitor 47 farad dengan tegangan maksimum 2,7volt tidak ada masalah. Akan tetapi, jika memperhitungkan komsumsi daya ketika *sensor node sleep*, maka setidaknya dengan beban ~50mW, superkapasitor harus dapat bertahan selama 30 menit. Modul penyuplai daya dengan memanfaatkan matahari ini hanya bertahan selama 24 menit saja dengan beban ~50mW. Hal ini membuat penggunaan super kapasitor 47farad dengan tegangan maksimum 2,7volt bermasalah. Solusinya adalah dengan memilih superkapasitor dengan kapasitas yang lebih tinggi. Kapasitansi 1,5 atau 2 kalinya sudah cukup untuk mengatasi permasalahan itu. Nilai kapasitansi didapat dengan menggunakan Persamaan 2.19. Berikut adalah contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai kapasitansi. Untuk beban 50 mW selama 30 menit membutuhkan energi sebesar  $50\text{mW} \times 30 \times 60 \text{ detik} = 90 \text{ J}$ . Dengan Persamaan 2.19, nilai kapasitansi yang didapat sebesar,

$$C = 2 E/V^2$$

$$C = 2 \times \frac{90 \text{ J}}{1,6 \text{ v} \times 1,6 \text{ v}}$$

$$C = 70,3125 \text{ F}$$

Alasan penggunaan nilai 1,6 volt untuk tegangan super kapasitor adalah karena super kapasitor penuh dengan tegangan 2,6 volt, bukan 2,7 volt. Super kapasitor tidak dapat menghasilkan tegangan *output* sebesar 3,3 volt ketika tegangannya sudah turun mencapai 1 volt, bukan 0 volt. Dengan demikian, nilai  $\Delta V_{\text{superkapasitor}}$  adalah  $2,6 \text{ volt} - 1 \text{ volt} = 1,6 \text{ volt}$ .

Dari hasil uji coba yang dilakukan, modul penyuplai daya ini dapat digunakan untuk menyuplai kebutuhan daya *sensor node* secara umum, karena tegangan *output* yang dihasilkan modul penyuplai daya ini, yaitu 3,3 volt



termasuk dalam rentang tegangan kerja kebanyakan *sensor node*, seperti *sensor node* MicroStrain[12], SyNode[13], TmoteSky[14], TinyNode[15], dan Iris[16]. Jika superkapasitor pada modul ini diganti dengan superkapasitor dengan kapasitansi 1,5 atau 2 kalinya, maka modul ini aman untuk digunakan sebagai penyuplai daya *sensor node* karena akan dapat bertahan meskipun dalam keadaan tidak ada matahari. Selain untuk *sensor node*, modul ini juga bisa digunakan untuk menyuplai alat-alat elektronik lain dengan daya rendah yang memiliki tegangan kerja 3,3 volt.



## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari hasil uji coba dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari menghasilkan tegangan stabil 3,3 volt sesuai dengan kebutuhan *sensor node*.
2. Kecepatan *charging* super kapasitor dipengaruhi oleh besar kecilnya intensitas matahari, makin tinggi intensitas matahari, makin cepat superkapasitor penuh.
3. Tegangan *output* modul sebesar 3,3 volt didapat ketika tegangan superkapasitor sudah melebihi 1 volt.
4. Modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari mampu menyuplai kebutuhan daya *sensor node* IEEE 802.15.4/Zigbee ketika keadaan aktif, yaitu sebesar 50mW.
5. Modul ini dapat menyuplai *sensor node* secara umum.
6. Penggunaan superkapasitor dengan kapasitas satu setengah atau dua kali dari kapasitas yang dipakai modul ini akan dapat menjamin suplai daya terus menerus di malam hari.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Tiwari, G.N, and Swapnil Dubey. *Fundamental of Photovoltaic Modules and their Application*. Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2010.
- [2] Darmoyo. “Penstabil Fluktuasi Tegangan Charger Handphone Tenaga Surya”. Skripsi, Universitas Negeri Semarang, 2007.
- [3] Castaner, Luis, and Santiago Silvestre. *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19, England: John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Boylestad, Robert L, and Nashelsky, Louis. *Electronic Devices and Circuit Theory 9<sup>th</sup> Ed*. Prentice Hall, 2005.
- [5] Zuhail and Zhanggischan. *Prinsip-Prinsip Dasar Elektro Teknik*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 2004.
- [6] Pease, Robert, A. *Analog Circuit World Class Design*. Oxford: Elsevier Inc, 2008.
- [7] Laurier, Steven. “Experimental Analysis of Photovoltaic Energy Scavenger for Sensor Node”. Master Thesis, University of Ghent, Belgium, 2007.
- [8] Dondi, D, et al. “A Solar Energy Harvesting Circuit for Low Power Applications”. ICSET 2008.
- [9] Brunelli D, et al. “Photovoltaic Cell Modelling for Solar Energy Powered Sensor Network”. 2007.
- [10] Brunelli, Davide, et al. “Design of a Solar-Harvesting Circuit for Batteryless Embedded Systems”. *IEEE Transaction on Circuit and Systems – I: Regulars Papers*, Vol. 56, No.11, November 2009.
- [11] <http://www.ultracapacitor.co.kr/ultracapacitor/comparsion.html>

- [12] Microstrain Inc., Microstrain wireless sensor comparison,  
[http://www.microstrain.com/product\\_datasheets/MicroStrain-wireless\\_product\\_comparison.pdf](http://www.microstrain.com/product_datasheets/MicroStrain-wireless_product_comparison.pdf)
- [13] SyNode sensor node datasheet.  
[http://www.murata-ws.com/datastore/media/zigbee\\_sensor\\_node\\_brief.pdf](http://www.murata-ws.com/datastore/media/zigbee_sensor_node_brief.pdf)
- [14] Moteiv Corporation. TmoteSky datasheet.  
<http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>
- [15] TinyNode 584 fact sheet.  
[http://www.tinynode.com/?q=system/files/TN584\\_Fact\\_Sheet\\_v\\_1\\_1.pdf](http://www.tinynode.com/?q=system/files/TN584_Fact_Sheet_v_1_1.pdf)
- [16] Iris datasheet.  
<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135%3Airis>
- [17] Linear Technology. LTC3401 datasheet.  
<http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3401fb.pdf>
- [18] Linear Technology. LTC1440 datasheet.  
<http://cds.linear.com/docs/Datasheet/144012fd.pdf>

## DAFTAR PUSTAKA

- Lynn, Paul A. *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19, England: John Wiley & Sons, 2010.
- Mike, Tooley. *Electronic Circuits Fundamentals and Applications 3<sup>rd</sup> Ed.* Oxford: Elsevier Ltd, 2006.
- Green, Martin. A. *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice Hall, New Jersey: 1998.
- Brunelli, Davide, et al. "An Efficient Energy Harvester for Wireless Sensor Node". 2008.
- Dong-Yun Lee, et al. "An Improved MPPT Converter Using Current Compensation Method for Small Scaled PV-Application". IEEE, 2003.
- Ahmad, Jawad, and Hee-Jun, Kim."A Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Low Power and Low Cost Photovoltaic Application". World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2009.
- Knopf, Hannes. "Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle". Master Thesis, Portland State University. Portland: 2009.
- Tariq, Abu and Jamil, Asghar. "Development of an Analog Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panel". IEEE Peds. 2005.
- Yi-Hwa, Liu et al. "Design and Implementation of a Maximum Power Point Tracking Battery Charging System for Photovoltaic Application".
- Swiegers, Wernher and Enslin, Johan H.R. "An Integrated Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panels". IEEE. 1998.
- Chulsung, Park and Chou, Pai H. "AmbiMax: Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-supply Wireless Sensor Node". IEEE.2006

Halomoan, Junarto. “Sistem Daya Tenaga Surya Untuk Komputer Bergerak”. Skripsi, Universitas Indonesia, 2006.

Insan, Muhammad. “Implementasi Switching Regulator Untuk Komputer Bergerak Dengan Tenaga Surya”. Skripsi, Universitas Indonesia, 2009.

<http://e-articles.info/e/a/title/Advantages-and-Disadvantages-of-Supercapacitor/>

<http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/Comparators.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_double-layer\\_capacitor](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor)

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7229>

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7230>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_diode)

[http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Solar\\_cell](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Solar_cell)

<http://www.cpfwiki.com/Wiki/index.php/Supercapacitors>



## Lampiran 1



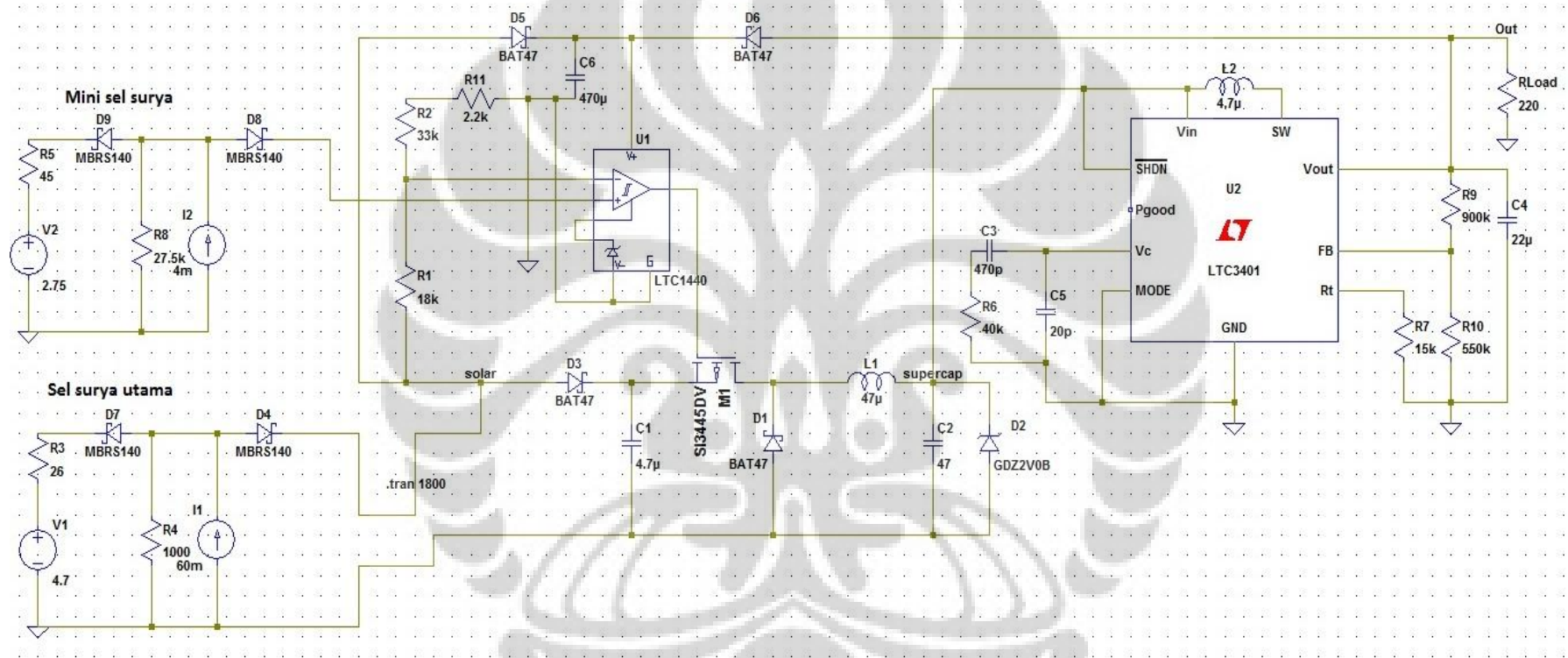
a



b

**Gambar 3.5 Modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari**

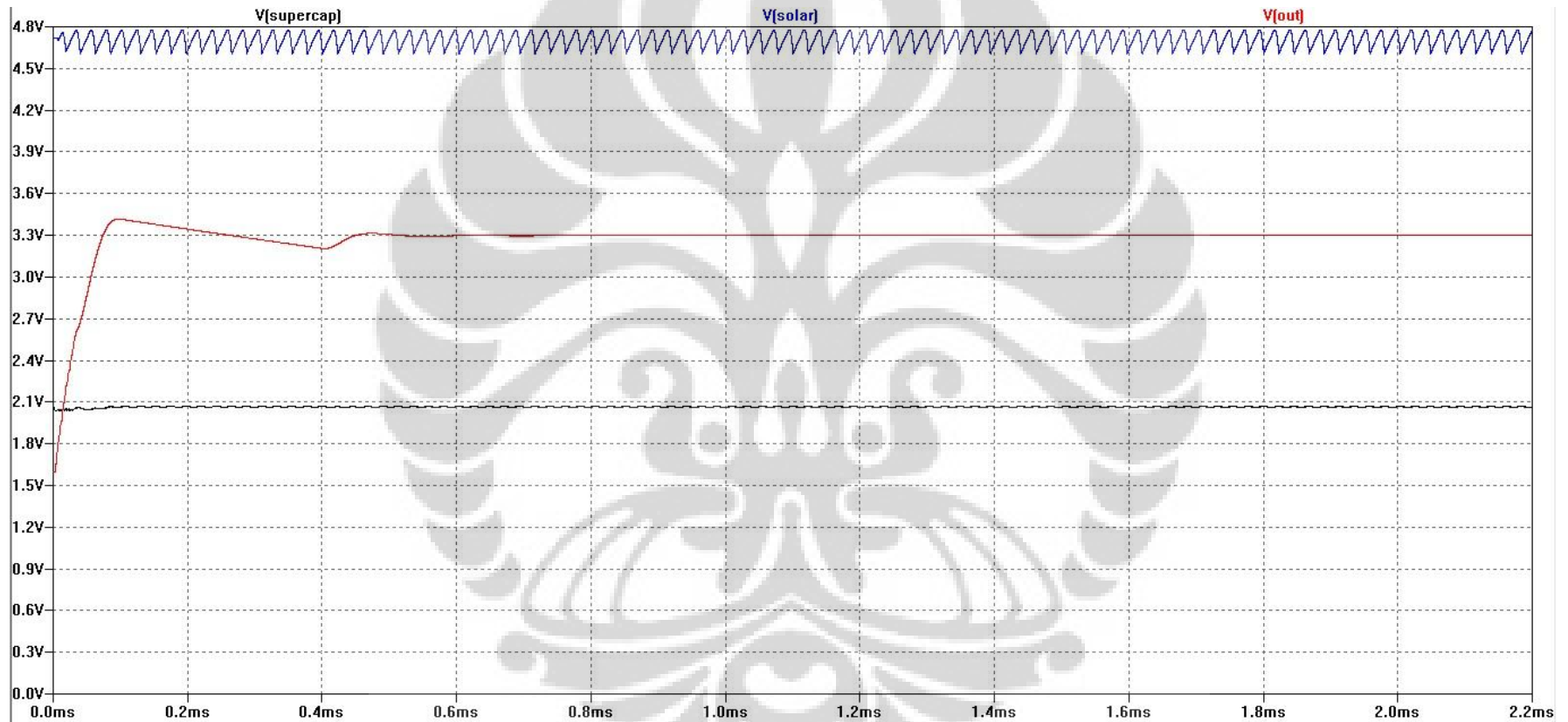
## Lampiran 2



Gambar 4.3 Rangkaian simulasi



### Lampiran 3



Gambar 4.4 Hasil simulasi rangkaian modul penyuplai daya dengan memanfaatkan energi matahari

## Lampiran 4

Tabel 4.1a Uji coba 1 tanpa beban

Waktu (menit)	Intensitas (x100 lux)	Is (mA)	Vs (Volt)	Vsk (Volt)	Vout (Volt)
0	889	46	4,64	0,385	0,035
2	917	46	4,73	0,788	0,42
4	1005	49	4,67	0,998	0,46
6	1011	49	4,67	1,138	3,3
8	983	48	4,67	1,242	3,3
10	992	49	4,65	1,445	3,3
12	1002	49	4,7	1,629	3,3
14	1005	49	4,66	1,804	3,3
16	1003	49	4,66	1,962	3,3
18	1006	49	4,68	2,101	3,3
20	1016	49,5	4,7	2,227	3,3
22	1016	49,5	4,67	2,342	3,3
24	1026	49,5	4,69	2,431	3,3
26	1029	49,5	4,68	2,519	3,3
28	1015	48	4,72	2,63	3,3
30	1030	49,5	4,74	2,632	3,3
32	1012	48	4,67	2,633	3,3

Tabel 4.1b Uji coba 2 tanpa beban

Waktu (menit)	Intensitas (x100 lux)	Is (mA)	Vs (Volt)	Vsk (Volt)	Vout (Volt)
0	460	23	4,52	0,362	0,08
2	515	25,5	4,55	0,616	0,34
4	606	30	4,85	0,834	0,4
6	783	38	4,7	0,88	0,4
8	765	38	4,74	0,973	0,6
10	902	42	4,7	1,147	3,3
12	992	47	4,62	1,346	3,3
14	984	46	4,59	1,501	3,3
16	959	46	4,6	1,664	3,3
18	980	46	4,68	1,831	3,3
20	988	47	4,64	1,967	3,3
22	1018	48	4,64	2,101	3,3
24	1009	47	4,61	2,217	3,3
26	1033	48	4,63	2,315	3,3
28	1028	48	4,63	2,4	3,3
30	1000	47	4,64	2,47	3,3
32	984	46	4,69	2,523	3,3
34	952	44	4,63	2,563	3,3
36	962	45	4,63	2,594	3,3
38	945	44	4,66	2,617	3,3
40	857	40	4,66	2,636	3,3

Tabel 4.1c Uji coba 3 tanpa beban

Waktu (menit)	Intensitas (x100 lux)	Is (mA)	Vs (Volt)	Vsk (Volt)	Vout (Volt)
0	919	45,5	4,57	0,385	0,32
2	816	38	4,55	0,77	0,4
4	945	46,5	4,74	0,994	0,8
6	200	10	4,57	0,998	0,6
8	974	48	4,63	1,252	3,3
10	980	48	4,62	1,446	3,3
12	501	30	4,33	1,619	3,3
14	1062	52	4,57	1,788	3,3
16	368	14	4,41	1,853	3,3
18	1107	55	4,75	1,955	3,3
20	1031	52	4,62	2,087	3,3
22	209	9	4,28	2,187	3,3
24	256	12	4,48	2,191	3,3
26	1146	56	4,83	2,248	3,3
28	885	42	4,71	2,349	3,3
30	1183	56,5	4,82	2,401	3,3
32	481	22	4,6	2,415	3,3
34	261	12	4,45	2,435	3,3
36	220	10	4,44	2,41	3,3
38	282	12	4,5	2,39	3,3
40	770	34	4,7	2,399	3,3
42	355	16	4,48	2,425	3,3
44	365	17	4,54	2,422	3,3
46	230	11	4,47	2,41	3,3
48	227	10	4,49	2,393	3,3
50	245	10	4,48	2,374	3,3
52	1105	54	4,78	2,458	3,3
54	1060	52	4,68	2,539	3,3
56	1075	52	4,76	2,532	3,3
58	292	14	4,42	2,578	3,3
60	1116	54	4,71	2,616	3,3

## Lampiran 5

Tabel 4.2a Uji coba 1 dengan beban 220ohm

Waktu (min)	Intensitas (x100 Lux)	Is (mA)	Vs (Volt)	Vsk (Volt)	Vout (Volt)
0	1054	50	4,65	0,48	0,1
2	1068	52	4,7	0,88	0,4
4	1068	49	4,74	0,954	0,4
6	1056	49	4,81	0,959	0,4
8	1047	49	4,86	1,105	3,3
10	1053	49	4,86	1,15	3,3
12	1040	48	4,98	1,218	3,3
14	1041	48	4,95	1,311	3,3
16	1011	48	4,97	1,386	3,3
18	1035	47,5	4,97	1,471	3,3
20	1000	46,5	5,02	1,447	3,3
22	988	46	5,04	1,62	3,3
24	1030	48	5,09	1,7	3,3
26	1040	48	5,06	1,779	3,3
28	1036	48	5,1	1,852	3,3
30	1040	48	5,11	1,925	3,3
32	1011	47	5,11	1,993	3,3
34	977	46	5,19	2,056	3,3
36	963	44	5,2	2,112	3,3
38	998	46	5,2	2,156	3,3
40	994	46	5,2	2,223	3,3
42	943	44	5,24	2,253	3,3
44	954	44	5,2	2,293	3,3
46	1035	47,5	5,3	2,287	3,3
48	1072	49	5,3	2,318	3,3
50	1100	50	5,33	2,356	3,3
52	1001	40	5,22	2,367	3,3
54	981	39	5,08	2,365	3,3
56	1001	46	5,3	2,392	3,3
58	997	41	5,28	2,394	3,3
60	1024	48	5,31	2,398	3,3
62	945	41	5,2	2,398	3,3

Tabel 4.2b Uji coba 2 dengan beban 220ohm, tegangan awal super kapasitor

$$V_{sk}=1,3V$$

Waktu (min)	Intensitas (x100 Lux)	Is (mA)	Vs (Volt)	Vsk (Volt)	Vout (Volt)
0	1045	49	4,65	1,3	3,3
2	1046	49,5	4,6	1,333	3,3
4	1040	49	4,65	1,431	3,3
6	1046	49,5	4,66	1,528	3,3
8	1045	49,5	4,66	1,602	3,3
10	1045	49,5	4,64	1,695	3,3
12	1042	49,5	4,65	1,79	3,3
14	1062	50	4,63	1,97	3,3
16	1063	50	4,64	1,965	3,3
18	1056	49,5	4,67	2,041	3,3
20	1067	51	4,61	2,14	3,3
22	1063	51	4,61	2,23	3,3
24	1052	50	4,67	2,309	3,3
26	1067	50	4,63	2,389	3,3
28	1063	50	4,72	2,47	3,3
30	1070	50	4,74	2,537	3,3
32	1060	49	4,8	2,606	3,3

## Lampiran 6

Tabel 4.3a Percobaan 1 dengan beban tanpa sel surya

Waktu (min)	Vsk (volt)	Vout (volt)
0	2,58	3,3
2	2,453	3,3
4	2,345	3,3
6	2,244	3,3
8	2,146	3,3
10	2,049	3,3
12	1,95	3,3
14	1,851	3,3
16	1,737	3,3
18	1,62	3,3
20	1,488	3,3
22	1,336	3,3
24	1,14	3,3
25.00	0,935	0,4

Tabel 4.3b Percobaan 2 dengan beban tanpa sel surya

Waktu (min)	Vsk (volt)	Vout (volt)
0	2,515	3,3
2	2,397	3,3
4	2,29	3,3
6	2,19	3,3
8	2,092	3,3
10	1,996	3,3
12	1,896	3,3
14	1,793	3,3
16	1,692	3,3
18	1,564	3,3
20	1,433	3,3
22	1,28	3,3
24	1,052	3,3
24.31	0,894	0,4

Tabel 4.3c Percobaan 3 dengan beban tanpa sel surya

Waktu (min)	Vsk (volt)	Vout (volt)
0	2,511	3,3
2	2,386	3,3
4	2,282	3,3
6	2,183	3,3
8	2,097	3,3
10	1,994	3,3
12	1,891	3,3
14	1,788	3,3
16	1,678	3,3
18	1,559	3,3
20	1,425	3,3
22	1,271	3,3
24	1,07	3,3
24.43	0,862	0,4