



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF
RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN
SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI**

SKRIPSI

MUHAMMAD RIFKI NUGROHO

0706267881

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF
RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN
SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana

MUHAMMAD RIFKI NUGROHO

0706267881

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI 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 : Muhammad Rifki Nugroho

NPM : 0706267881

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Muhammad Rifki Nugroho
NPM : 0706267881
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID
Berbasis Tenaga Surya dengan Superkapasitor sebagai
Media Penyimpan Energi

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.



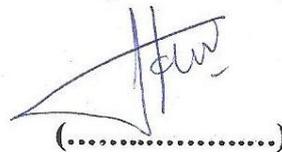
(.....)

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



(.....)

Penguji 2 : Dr. Abdul Halim M.Eng.



(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

LEMBAR PERSETUJUAN

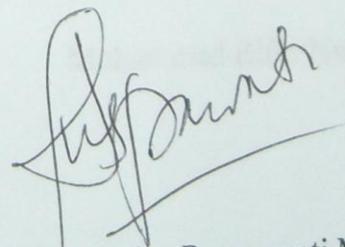
Skripsi dengan judul :

RANCANG BANGUN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI

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, Juni 2011

Dosen Pembimbing



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

NIP: 196101241986022001

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala rahmat dan penyertaan-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Pertama, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

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

selaku pembimbing yang membantu memberikan arahan dan nasihat sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

Ir. Purnomo Sidi Priambodo M.Sc., Ph.D.,

selaku Kepala Laboratorium Elektronika dan fasilitator perangkat RFID.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2011

Muhammad Rifki Nugroho

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Muhammad Rifki Nugroho
NPM : 0706267881
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 Nonokklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

RANCANG BANGUN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI

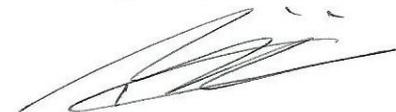
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Juli 2010

Yang menyatakan



Muhammad Rifki Nugroho

ABSTRAK

Nama : Muhammad Rifki Nugroho
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Rancang Bangun Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya dengan Superkapasitor sebagai Media Penyimpan Energi

Tag Aktif RFID merupakan suatu divais dengan daya yang rendah. Tag ini seringkali digunakan sebagai perangkat *tracking devices*, pada pengoperasiannya tag ini akan berada di wilayah yang jauh dari akses sumber tenaga listrik. Oleh karena itu divais ini membutuhkan suatu sumber tenaga yang mandiri. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut tenaga surya dapat digunakan karena tenaga surya yang berasal dari cahaya matahari terdapat dimana saja. Suatu media penyimpanan energi dibutuhkan untuk menunjang tenaga surya sebagai sumber tenaga, untuk peran tersebut, superkapasitor dapat digunakan. Kemampuan *lifecycle* superkapasitor yang panjang menjadi keunggulan superkapasitor sebagai media penyimpanan energi, dimana superkapasitor dapat menjalani proses *charge* dan *discharge* dengan jumlah yang jauh lebih banyak dibanding baterai. Pada skripsi ini akan dibuat rancang bangun dari implementasi panel surya sebagai sumber energi listrik dengan superkapasitor sebagai media penyimpan energi untuk Tag Aktif RFID.

Kata kunci : Tag Aktif RFID, Panel Surya, Superkapasitor

ABSTRACT

Nama : Muhammad Rifki Nugroho
Study Program : Electrical Engineering
Title : Design of Solar Power System For Active RFID Tag with Supercapacitor as Energy Storage

Active RFID Tag is a device with low power consumption. This Tag are used to be a tracking devices that operate on remote area and far from electrical power source. Thus, this device need an independent power source, in order to achieve that, a solar cell can be used because the sunlight can be found anywhere. To support a solar cell as a power source, an energy storage are needed and to fullfill that need, a supercapacitor can be used. The advantages of supercapacitor as an energy storage are its long lifecycle that means a lot more amount of charging and discharging process compared to conventional battery. On this thesis, the design and fabrication of solar cell implementation as electrical power source with supercapacitor as energy storage for Active RFID Tag will be covered.

Keyword : Active RFID Tag, Solar Cell, Supercapacitor

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
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.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
1.6 Metode Penelitian.....	3
BAB 2 DASAR TEORI.....	4
2.1 Karakteristik Cahaya Matahari.....	4
2.2 Panel Surya.....	5
2.3 Parameter Panel Surya.....	7
2.3.1 <i>Short-Circuit Current</i> (I_{sc}).....	7
2.3.2 <i>Open-Circuit Voltage</i> (V_{oc}).....	8
2.3.3 <i>Fill Factor</i> (FF).....	8
2.3.4 Efisiensi (η).....	8
2.3.5 Kurva I-V Sel Surya.....	9
2.4 <i>Array</i> Sel Surya.....	9
2.5 Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi Surya.....	10
2.6 Regulator Tegangan.....	12
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI.....	16
3.1 Tag Aktif RFID.....	16
3.2 Regulator Beban.....	17
3.3 Superkapasitor.....	19
3.4 Regulator Superkapasitor.....	21
3.5 Panel Surya.....	22
3.6 Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi.....	23
BAB 4 SIMULASI.....	24
4.1 Pemodelan Panel Surya.....	24
4.2 Simulasi Proses <i>Charging</i>	26
4.3 Simulasi Proses <i>Discharging</i>	28
BAB 5 UJI COBA DAN ANALISIS.....	30
5.1 Kondisi Tanpa Beban.....	30

5.1.1	<i>Charging</i> Tanpa Beban	30
5.1.2	<i>Discharging</i> Tanpa Beban	32
5.2	Kondisi Dengan Beban (16k Ω)	33
5.2.1	<i>Charging</i> Dengan Beban (16k Ω)	33
5.2.2	<i>Discharging</i> Dengan Beban (16k Ω)	36
5.3	Kondisi Dengan Beban (Tag RFID).....	36
5.4	Efisiensi.....	37
BAB VI KESIMPULAN		39
DAFTAR ACUAN		40
DAFTAR PUSTAKA		41
LAMPIRAN.....		42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Distribusi Spektrum Radiasi Matahari	4
Gambar 2.2 Proses Pada Panel Surya	6
Gambar 2.3 Kurva I-V Sel Surya	9
Gambar 2.4 Struktur kapasitor, kapasitor elektrolit, dan superkapasitor	11
Gambar 2.5 Proses <i>charging-discharging</i> pada superkapasitor dan baterai	11
Gambar 2.6 Blok diagram <i>Series Regulator</i>	13
Gambar 2.7 Regulator tegangan <i>emitter follower</i>	13
Gambar 2.8 <i>Loop I</i> regulator tegangan <i>emitter follower</i>	14
Gambar 3.1 Panel Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Penyimpan Energi	16
Gambar 3.2 M100 Asset Tag	16
Gambar 3.3 Rangkaian Regulator Beban	17
Gambar 3.4 Superkapasitor EDLHW306D2R3R dan konfigurasinya	20
Gambar 3.5 Regulator Tegangan Superkapasitor	21
Gambar 3.6 Panel Surya	22
Gambar 3.7 Sistem Sumber Daya Tag Aktif Rfid Berbasis Tenaga Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi	23
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi	24
Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Arus <i>Short Circuit</i> Sel Surya	25
Gambar 4.3 Rangkaian ganti sel surya	25
Gambar 4.4 Pemodelan Karakteristik IV Sel Surya	26
Gambar 4.5 Grafik Tegangan vs Waktu hasil simulasi proses <i>charging</i>	27
Gambar 4.6 Grafik Arus vs Waktu hasil simulasi proses <i>charging</i>	28
Gambar 4.7 Rangkaian simulasi proses <i>discharging</i>	28
Gambar 4.8 Hasil simulasi proses <i>discharging</i>	29
Gambar 5.1 Grafik arus <i>charging</i> terhadap waktu	31
Gambar 5.2 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses <i>charging</i>	32
Gambar 5.3 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses <i>discharging</i>	33
Gambar 5.4 Grafik arus superkapasitor terhadap waktu pada proses <i>charging</i> dengan beban	34
Gambar 5.5 Grafik tegangan superkapasitor terhadap waktu pada proses <i>charging</i> dengan beban	35
Gambar 5.6 Grafik tegangan keluaran sistem terhadap waktu pada proses <i>charging</i> dengan beban	35
Gambar 5.7 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses <i>discharging</i> dengan beban	36
Gambar 5.8 Grafik efisiensi proses <i>charging</i>	38
Gambar 5.9 Grafik efisiensi proses <i>discharging</i>	38

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1 Proses <i>discharging</i> dengan beban Tag RFID.....	37
--	----



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi matahari memiliki potensi yang besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi bagi divais-divais elektronik yang berkembang saat ini. Energi matahari merupakan energi yang terdapat dimanapun selama di wilayah tersebut terdapat cahaya matahari. Perkembangan panel surya telah membuka jalan bagi pemanfaatan energi matahari, dengan panel surya, energi foton dalam cahaya matahari dapat diubah menjadi energi listrik untuk menyuplai berbagai macam divais elektronika. Panel surya cocok digunakan untuk mensuplai divais elektronika yang berdaya rendah yang beroperasi di wilayah-wilayah yang *remote*, dimana suplai energi listrik sulit didapat.

Penggunaan tenaga surya biasa diikuti dengan penggunaan baterai sebagai media penyimpan energi, mengingat bahwa cahaya matahari tidak konstan dikarenakan berbagai hal, seperti saat malam hari dan juga akibat dari cuaca. Penggunaan tenaga surya disertai dengan baterai dapat mengatasi masalah suplai energi untuk divais yang berada pada wilayah *remote*. Namun penggunaan baterai masih mempunyai kendala, yaitu dalam hal *lifecycle*, yaitu kemampuan baterai untuk menjalani sejumlah proses *charging* dan *discharging*, yang hanya sedikit. Pada divais yang berada di wilayah *remote*, penggantian baterai sulit untuk dilakukan dikarenakan letak divais yang jauh dari jangkauan operator.

Penggunaan baterai sebagai penyimpan energi masih memiliki kekurangan dalam hal *lifecycle*-nya. Untuk mengatasi masalah tersebut dapat digunakan superkapasitor sebagai substitusi dari baterai. Superkapasitor dapat menyimpan energi dalam bentuk muatan listrik, sama seperti kapasitor konvensional, hanya saja pada superkapasitor kapasitas yang disimpan berjumlah jauh lebih besar. Superkapasitor memiliki *lifecycle* yang lebih lama dibanding dengan baterai, sehingga

dengan mensubstitusi baterai dengan superkapasitor, masalah *lifecycle* media penyimpan energi pada divais pada daerah *remote* dapat diatasi.

Salah satu contoh divais berdaya rendah yang beroperasi pada wilayah *remote* adalah Tag Aktif RFID. Tag Aktif RFID dapat digunakan sebagai *tracking devices*, dimana benda yang di-*track* seringkali berada di wilayah yang terpencil dan sulit dijangkau, contohnya adalah pada penggunaan Tag RFID sebagai *tracking devices* untuk binatang liar. Dengan demikian, divais pada wilayah *remote* memiliki masalah pada hal suplai energi, dengan menggunakan panel surya dengan superkapasitor sebagai media penyimpan energi, Tag RFID dapat beroperasi dengan meminimalisir perawatan dari sisi suplai energi.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang dibahas pada skripsi ini berkisar pada rancang bangun aplikasi panel surya dan superkapasitor sebagai sumber daya untuk Tag Aktif RFID, secara rinci masalah yang dibahas adalah :

1. Penggunaan panel surya untuk memberikan sumber tenaga listrik yang sesuai dengan karakteristik daya untuk Tag Aktif RFID.
2. Penggunaan superkapasitor sebagai media penyimpan energi untuk Tag Aktif RFID.
3. Manajemen daya untuk pengaplikasian panel surya dan superkapasitor pada Tag Aktif RFID.

1.3 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk membuat rancang bangun sumber daya untuk Tag Aktif RFID dengan panel surya sebagai sumber tenaga dan superkapasitor sebagai media penyimpan energy.

1.4 Batasan Masalah

Masalah yang dibahas pada skripsi ini dibatasi pada rancang bangun aplikasi panel surya sebagai sumber energi dan superkapasitor

sebagai media penyimpan energi untuk perangkat Tag Aktif RFID. Poin penting pada skripsi ini adalah pada penggunaan panel surya dan superkapasitor serta perancangan sirkuit manajemen daya untuk diaplikasikan pada Tag Aktif RFID.

1.5 Sistematika Penulisan

Bab 1 : Pendahuluan, bab ini membahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan skripsi, batasan masalah, sistematika penulisan, dan metode penelitian. Bab 2 : Dasar Teori, bab ini membahas tentang teori-teori yang mendukung bahasan seminar ini. Bab 3 : Rancangan Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya. bab ini membahas tentang rancangan dari Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya, Bab 4 : Simulasi, bab ini membahas tentang simulasi Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya. Bab 5 : Uji Coba dan Analisis, bab ini membahas tentang pengujian purwarupa sistem yang dibuat disertai dengan hasil pengukuran dan analisis hasil yang didapatkan. Bab 6 : Kesimpulan, bagian ini akan berisi kesimpulan dari percobaan yang dilakukan.

1.6 Metode Penelitian

Pada skripsi ini dilakukan beberapa metode untuk memecahkan masalah, yaitu:

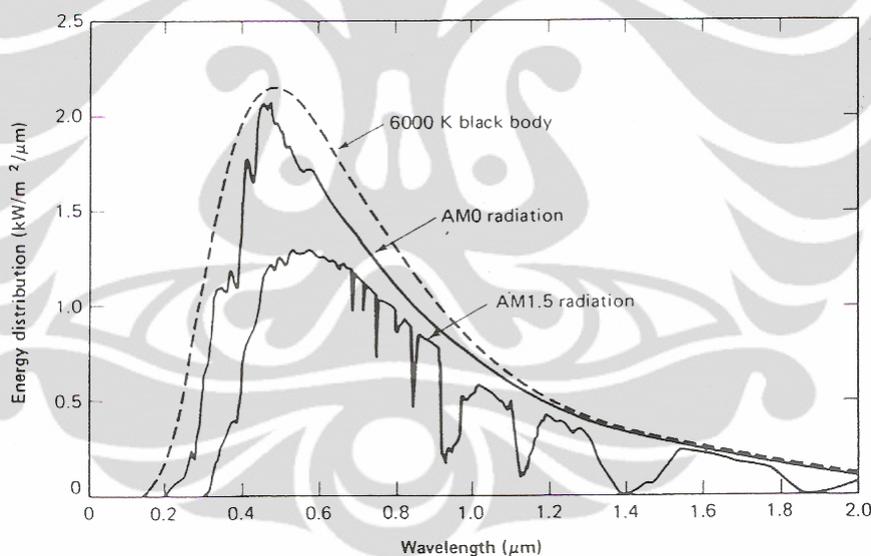
1. Studi literatur
2. Pengukuran panel surya
3. Perancangan sistem
4. Simulasi
5. Pembuatan alat
6. Uji coba alat dan analisis

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Karakteristik Cahaya Matahari

Cahaya matahari merupakan sumber energi yang dapat dikatakan sebagai sumber energi yang selalu tersedia. Cahaya matahari akan selalu ada, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber tenaga. Menurut Departemen ESDM, ketersediaan energi matahari di Indonesia mencapai $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ untuk Kawasan Barat Indonesia (KBI) dan nilainya mencapai $5,1 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ untuk Kawasan Timur Indonesia (KTI)[1]. Standar untuk spektrum cahaya matahari dinyatakan dalam *Air Mass* (AM) dengan indeks AM0 untuk kondisi di luar angkasa dan indeks AM1,5 untuk kondisi di permukaan laut. Distribusi spektrum matahari dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Distribusi Spektrum Radiasi Matahari[2]

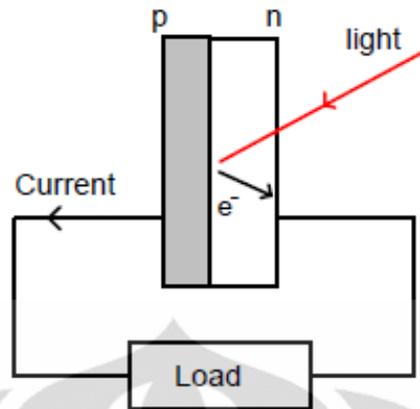
Intensitas cahaya matahari yang sampai ke bumi dipengaruhi oleh atenuasi sebesar 30% yang disebabkan oleh tiga hal[3], yaitu :

1. *Rayleigh Scattering*
2. *Scattering* oleh aerosol dan debu
3. Absorpsi oleh atmosfer dan gas yang ada di bumi

2.2 Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat yang dapat mengkonversi energi dari cahaya matahari langsung menjadi energi listrik. Panel surya bekerja dengan prinsip *photovoltaic*. *Photovoltaic* merupakan proses perubahan energi yang dibawa oleh foton, yaitu partikel cahaya yang membawa paket energi, menjadi energi listrik berupa arus dan tegangan. Pada efek *photovoltaic*, material yang digunakan adalah semikonduktor seperti *monocrystalline silicon*, *polycrystalline silicon*, *amorphous silicon*, *cadmium telluride*, dan *copper indium selenide/sulfide*, ketika material semikonduktor tersebut terkena cahaya matahari, maka foton akan menyebabkan terbentuk elektron dan *hole* pada material tersebut, elektron dan *hole* tersebutlah yang akan mengalir dan menghasilkan arus listrik.

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[4]

Besarnya *photocurrent* yang muncul pada sel surya besarnya tergantung terhadap cahaya yang mengenai sel surya. Hubungan antara *photocurrent density* dengan cahaya dapat dilihat pada Persamaan 2.1 [5].

$$J_L = q \int b_s(E)QE(E)dE \quad (2.1)$$

q adalah muatan dari elektron dimana $q = 1,60217646 \times 10^{-19}C$. $QE(E)$ 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 dengan hubungan digambarkan pada Persamaan 2.2 [6]

$$b_s(E) = 10^{16} \frac{I_\lambda \lambda}{19.8} \quad (2.2)$$

Satuan dari *Spectral Photon Flux* adalah $\text{photon cm}^{-2} \text{um}^{-1} \text{s}^{-1}$, dengan I_λ adalah *irradiance* dari cahaya matahari dan λ adalah panjang gelombang. Besaran E pada Persamaan 2.1 menyatakan energi, E dapat dinyatakan dalam sebagai panjang gelombang seperti pada Persamaan 2.3.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

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* yang dihasilkan, nilai rapat arus ini dipengaruhi oleh tegangan dan juga temperatur, hubungan keduanya dapat dilihat pada Persamaan 2.4[7].

$$J_{dark}(V) = J_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.4)$$

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 dari dioda *PN-Junction* dari sel surya yang nilainya konstan.

Kedua rapat arus ini *photocurrent* dan *dark current* membentuk arus yang dihasilkan oleh sel surya, rapat arus total yang dihasilkan adalah superposisi dari kedua jenis rapat arus tersebut.

$$J = J_L - J_{dark} \quad (2.5)$$

Sehingga total arus dari sel surya dapat dihitung sebagai berikut,

$$J = J_L - J_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.6)$$

Persamaan 2.6 dinyatakan dalam rapat arus (J), persamaan dalam bentuk arus (I) adalah seperti pada Persamaan 2.7

$$I = I_L - I_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.7)$$

2.3 Parameter Panel Surya

2.3.1 Short-Circuit Current (I_{sc})

Short-circuit current merupakan arus yang timbul pada saat sel surya berada dalam keadaan *short circuit*, besarnya arus ini idealnya sama dengan besarnya arus *photocurrent*[8].

$$I_{sc} = I_L \quad (2.8)$$

2.3.2 *Open-Circuit Voltage (V_{oc})*

Open-circuit voltage adalah tegangan yang muncul dari sel surya saat keadaan terbuka, nilai V_{oc} dapat dicari dengan memasukkan nilai 0 untuk parameter I pada persamaan arus sel surya[8], seperti pada Persamaan 2.9, sehingga,

$$0 = I_L - I_0(e^{qV/k_B T} - 1) \quad (2.9)$$

maka V_{oc} adalah,

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.10)$$

2.3.3 *Fill Factor (FF)*

Fill Factor merupakan perbandingan antara daya maximum yang dihasilkan oleh sel surya dengan perkalian antara V_{oc} dengan I_{sc} .

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.11)$$

V_m dan I_m merupakan tegangan dan arus dimana daya yang dihasilkan adalah maksimum.

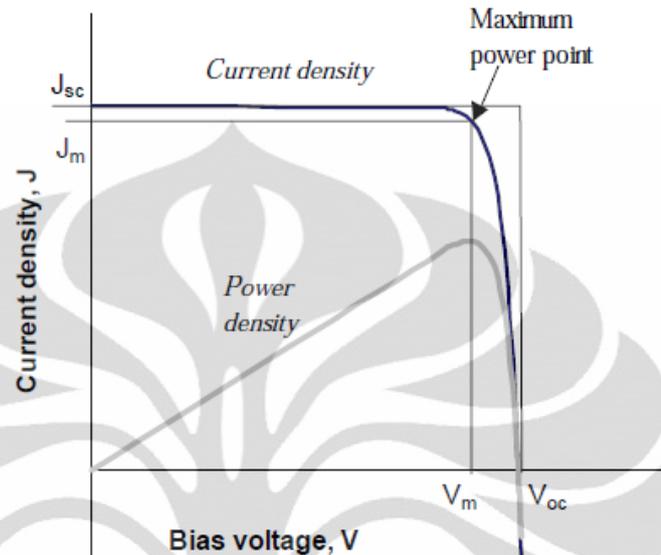
2.3.4 *Efisiensi (η)*

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 Persamaan 2.12

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2.12)$$

2.3.5 Kurva I-V Sel Surya

Hubungan antara tegangan dan arus pada sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.3,



Gambar 2.3 Kurva I-V Sel Surya[9]

Gambar 2.3 merupakan karakteristik kurva arus – tegangan/kurva IV (hitam) dan kurva daya – tegangan/kurva PV (abu-abu) dari sel surya ideal. *Power Density* mencapai maksimum pada tegangan V_m , sedikit di bawah V_{oc} . Daya maksimum dicapai dari $V_m \times J_m$ digambarkan pada luas area kurva persegi bagian dalam, sedangkan luas area persegi bagian luar merupakan hasil dari $V_{oc} \times J_{sc}$ [9]. Daya maksimum yang dapat dikeluarkan oleh sel surya dicapai pada titik *Maximum Power Point*, yaitu titik dimana nilai tegangan dan arus sel surya berada pada puncak kurva *Power Density*.

2.4 Array Sel Surya

Sel surya yang digunakan adalah sel surya dalam bentuk *array*, pada sistem ini sel surya disusun sedemikian rupa untuk menghasilkan daya dan tegangan yang diinginkan, susunan sel surya ini dapat berupa susunan seri dan paralel dengan aturan seperti pada Persamaan 2.13 dan Persamaan 2.14[10] di bawah ini

$$N_{series} = \frac{V_{output}}{0,9V_{oc}} \quad (2.13)$$

Persamaan 2.13 menentukan berapa jumlah sel surya yang harus disusun seri untuk mendapatkan tegangan *output* V_{output} .

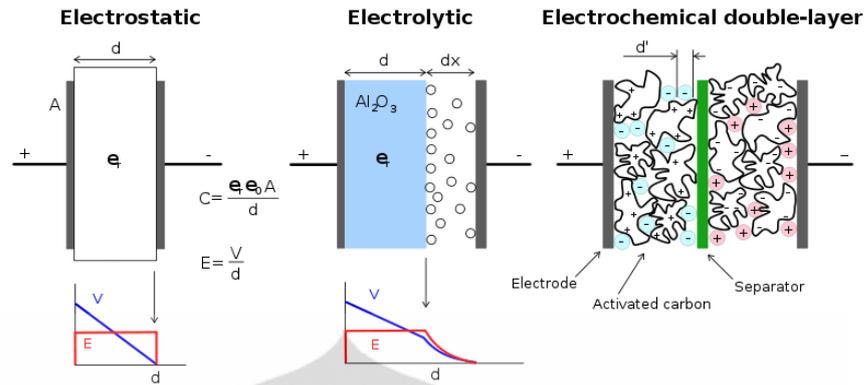
$$N_{paralel} = \frac{P_{output}}{V_{output} (0,9I_{sc})} \quad (2.14)$$

Persamaan 2.14 menentukan berapa jumlah sel surya yang harus disusun paralel untuk mendapatkan daya *output* P_{output} .

2.5 Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi Surya

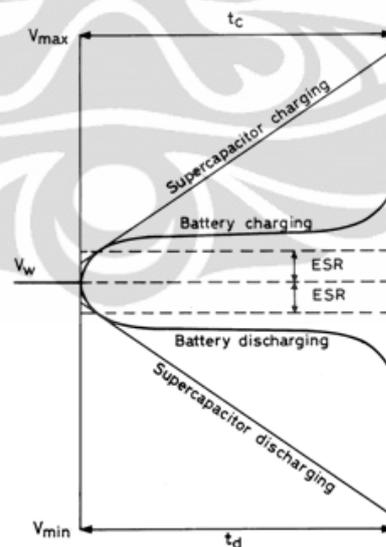
Cahaya matahari memiliki intensitas yang berubah-ubah sesuai dengan kondisi lingkungan. Perubahan dari kondisi intensitas cahaya matahari tersebut membuat suplai daya dari sel surya menjadi tidak stabil, oleh karena itu suatu sel surya membutuhkan suatu media penyimpanan energi sebagai penyuplai energi cadangan saat intensitas cahaya matahari tidak mencukupi untuk memberikan daya. Media penyimpanan energi pada sel surya biasanya berupa baterai, namun pada seminar ini media penyimpanan energi yang dipakai adalah superkapasitor.

Superkapasitor merupakan suatu kapasitor dengan nilai kapasitansi yang jauh lebih besar daripada kapasitor biasa. Hal yang membedakan superkapasitor dengan kapasitor biasa adalah pada strukturnya, pada superkapasitor elektroda yang dipakai berbasis pada material karbon, tidak seperti kapasitor biasa yang menggunakan metal. Selain itu, tidak seperti kapasitor konvensional, kedua elektroda tidak dipisahkan oleh dielektrik, efek kapasitansi superkapasitor muncul akibat dua *layer* substrat karbon yang terpisah pada jarak sangat kecil di skala nanometer. Luas permukaan elektroda dapat diperbesar karena *range* dari jarak antar layer superkapasitor berada pada skala nanometer, sehingga didapat suatu kapasitansi yang besar untuk ukuran divais yang sama dengan kapasitor konvensional[11]. Gambar 2.4 menunjukkan struktur superkapasitor



Gambar 2.4 Struktur kapasitor, kapasitor elektrolit, dan superkapasitor[11]

Superkapasitor memiliki keunggulan dibanding dengan baterai, keunggulan tersebut diantaranya adalah, *Life-cycle* yang lebih panjang, impedansi yang rendah, waktu *charge* dan *discharge* yang cepat, dan memiliki rating *charge* dan *discharge* yang tinggi. Namun, superkapasitor juga memiliki kekurangan, superkapasitor memiliki tegangan yang rendah dibanding baterai, *self-discharge* yang tinggi dan memerlukan kontrol elektronik yang lebih rumit. Berikut adalah Gambar 2.5, yaitu grafik perbandingan antara proses *charging-discharging* pada superkapasitor dan baterai.



Gambar 2.5 Proses *charging-discharging* pada superkapasitor dan baterai [12]

Pada Gambar 2.5 terlihat perbedaan antara proses *charging-discharging* pada baterai dan superkapasitor, superkapasitor memiliki proses yang linear, sedangkan pada baterai tidak. Lamanya waktu *back up* dari superkapasitor dapat dihitung

menggunakan persamaan layaknya kapasitor elektrolit konvensional, seperti pada Persamaan 2.15[13].

$$t = C \frac{\Delta V}{I} \quad (2.15)$$

t adalah waktu *back up*, C adalah nilai dari kapasitansi kapasitor, ΔV adalah selisih dari tegangan awal dari superkapasitor dengan tegangan pada saat *cut-off* yaitu saat dimana tegangan yang dimiliki superkapasitor tidak mampu lagi untuk mencatu divais, I adalah besarnya arus yang disuplai oleh superkasitor. Dengan Persamaan 2.15 dapat dilihat bahwa lamanya waktu *back up* dari superkapasitor sebanding dengan besarnya kapasitansi superkapasitor dan berbanding terbalik dengan besarnya arus yang dikeluarkan oleh superkasitor. Karakteristik dari superkapasitor tidak berbeda dengan kapasitor konvensional, sehingga aturan dalam penyusunan seri ataupun paralel superkapasitor juga sama dengan kapasitor konvensional, yaitu

$$C_t = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.16)$$

Untuk susunan paralel, dan,

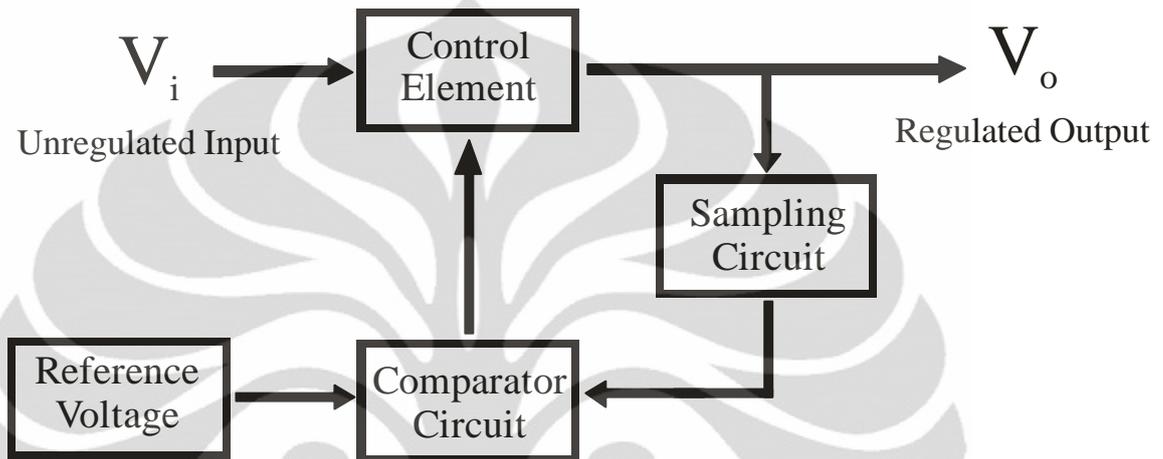
$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.17)$$

Untuk susunan seri.

2.6 Regulator Tegangan

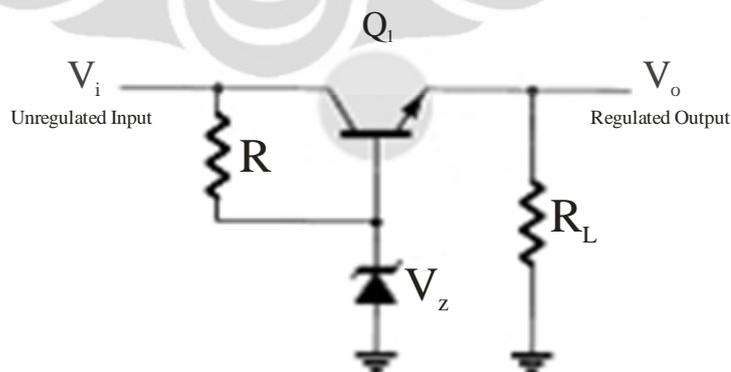
Seperti telah disebutkan di Subbab 2.2, cahaya matahari tidaklah konstan, sehingga *output* yang dihasilkan juga tidaklah konstan. Dengan kondisi tersebut, maka suplai tegangan yang dihasilkan oleh sel surya harus diberikan suatu perlakuan agar dapat menghasilkan tegangan yang stabil. Untuk menstabilkan tegangan keluaran dari sel surya digunakanlah sirkuit regulator tegangan, regulator ini akan berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran dengan menggunakan umpan balik yang menginformasikan perubahan tegangan ke sirkuit kontrol untuk melakukan perbaikan terhadap tegangan keluaran.

Pada skripsi ini akan digunakan regulator tegangan linear berupa rangkaian *series regulator* berupa *emitter follower* yang terdiri dari dioda zener sebagai referensi tegangan dan *pass transistor* sebagai pengatur suplai arus. Blok diagram *Series Regulator* dapat dilihat pada Gambar 2.6. Pada Gambar 2.6, blok *Comparator Circuit* berfungsi untuk memberikan sinyal pada blok *Control Element* untuk menaikkan atau menurunkan tegangan untuk menjaga agar tegangan keluaran tetap stabil.



Gambar 2.6 Blok diagram *Series Regulator*[14]

Bentuk *Series Regulator* yang paling dasar adalah konfigurasi *emitter follower*, Gambar 2.7 menunjukkan rangkaian regulator tegangan *emitter follower*, transistor Q_1 berfungsi sebagai *Control Element* dan dioda zener memberikan referensi tegangan sebesar V_z dengan R berfungsi untuk menentukan besarnya arus yang diperlukan untuk mengaktifkan dioda zener.

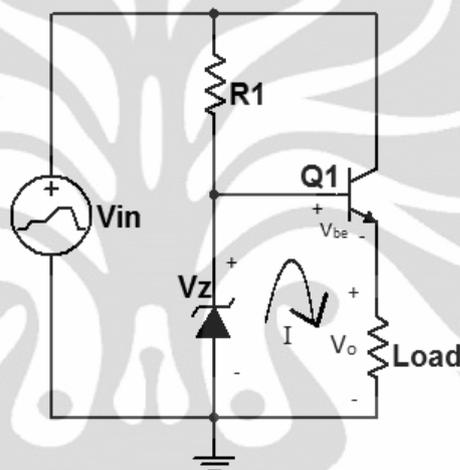


Gambar 2.7 Regulator tegangan *emitter follower*[14]

Proses regulasi tegangan dapat digambarkan sebagai berikut :

1. Jika tegangan output V_o berkurang maka tegangan antara base – emiter transistor juga berkurang mengakibatkan transistor akan mengalirkan listrik lebih banyak dan menaikkan tegangan kembali.
2. Jika tegangan output V_o bertambah maka tegangan antara base – emiter transistor juga bertambah mengakibatkan transistor akan mengalirkan listrik lebih sedikit dan menurunkan tegangan kembali.[14]

Besarnya tegangan keluaran V_o dapat dicari dengan melihat *loop* I pada rangkaian *series regulator* pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Loop* I regulator tegangan *emitter follower*

Dari *Loop* I didapat Persamaan 2.18,

$$V_z - V_{be} - V_o = 0 \quad (2.18)$$

sehingga nilai dari tegangan output dapat dicari dengan Persamaan 2.17

$$V_o = V_z - V_{be} \quad (2.19)$$

R_1 pada Gambar 2.8 berfungsi untuk memberikan arus yang cukup untuk dioda zener supaya dapat menghasilkan tegangan referensi V_z , nilai dari R_1 didapatkan dengan Persamaan 2.19.

$$R_1 = \frac{V_{in} - V_z}{I_z + I_b} \quad (2.20)$$

V_{in} adalah tegangan masukan yang belum teregulasi, V_z adalah tegangan referensi dioda zener, I_z adalah arus minimum yang dibutuhkan oleh dioda zener supaya dapat

memberikan tegangan referensi, dan I_b adalah arus yang mengalir pada basis transistor $Q1$. Nilai dari I_b akan tergantung dari beban yang terhubung, dimana nilai I_b didapat dengan Persamaan 2.20

$$I_b = \frac{I_{load}}{h_{fe}} \quad (2.21)$$

I_{load} adalah arus yang dikonsumsi oleh beban dan h_{fe} adalah *small signal Forward Current Gain* dari transistor $Q1$.



BAB 3

PERANCANGAN SISTEM SUMBER DAYA TAG AKTIF RFID BERBASIS TENAGA SURYA DENGAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI

Pada skripsi ini akan dibuat rancang bangun sistem sumber daya untuk Tag Aktif RFID dengan panel surya sebagai sumber tenaga. Untuk menjadikan tenaga matahari sebagai sumber energi diperlukan sebuah sistem yang terdiri dari panel surya, regulator dan media penyimpanan energi, pada skripsi ini media penyimpan energi yang dipakai adalah superkapasitor. Sistem yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.1, panel surya dilengkapi dengan dua buah regulator tegangan, dimana blok Regulator Superkapasitor berfungsi untuk menjaga agar tegangan yang masuk ke superkapasitor tidak melebihi tegangan rating dari superkapasitor. Blok Regulator Beban berfungsi untuk mengatur tegangan DC keluaran dari superkapasitor agar sesuai dengan spesifikasi Tag Aktif RFID.



Gambar 3.1 Panel Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Penyimpan Energi

3.1 Tag Aktif RFID

Tag Aktif RFID menjadi bahasan pertama pada bab ini karena karakteristik dari bagian inilah yang akan menentukan rancangan dari bagian-bagian yang lain. Tag Aktif RFID yang digunakan pada skripsi ini adalah Tag Aktif RFID keluaran RFCode dengan tipe M100 Asset Tag[15]. Gambar 3.2 menunjukkan bentuk fisik dari Tag Aktif RFID tipe M100.

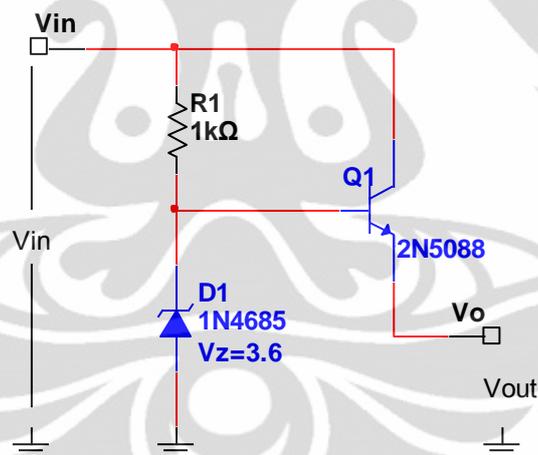


Gambar 3.2 M100 Asset Tag[15]

Tag ini bekerja dengan suplai daya berasal dari baterai Lithium CR2032 yang memiliki tegangan keluaran 3V[16]. Pada skripsi ini, fungsi dari baterai Lithium CR2032 akan diganti dengan sistem sumberdaya berbasis tenaga surya. Melalui percobaan di lapangan didapat nilai tegangan dan arus yang dikonsumsi oleh tag ini adalah sebesar 2,8V dan 0,16mA (data terlampir), maka untuk perancangan sistem selanjutnya akan didasari pada data tegangan dan arus tersebut.

3.2 Regulator Beban

Regulator tegangan ini berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran agar sesuai karakteristik yang dibutuhkan oleh Tag M100. Target tegangan keluaran dari regulator ini mengacu pada tegangan keluaran baterai Lithium CR2032, yaitu sebesar 3V. Regulator tegangan yang dipakai adalah *Series Regulator* dengan menggunakan Transistor BJT dengan konfigurasi *Emitter Follower* seperti yang telah dijelaskan pada Subbab 2.6. Gambar 3.3 adalah rangkaian dari regulator beban.



Gambar 3.3 Rangkaian Regulator Beban

Untuk mencapai target tegangan keluaran sebesar 3V, maka aspek yang perlu diperhitungkan dapat dicari menggunakan Persamaan 2.19, dengan memasukkan tegangan keluaran $V_o = 3V$, sehingga,

$$V_o = V_z - V_{be}$$

$$3 = V_z - V_{be}$$

$$V_z = 3 + V_{be}$$

karena transistor yang digunakan adalah transistor silikon, maka $V_{be} = 0,7V$

$$V_z = 3 + 0,7$$

$$V_z = 3,7 \text{ V}$$

Oleh karena itu, dibutuhkan dioda zener dengan nilai V_z sebesar 3,7V; namun dioda zener tersebut tidak dijual di pasaran, maka untuk rancangan ini digunakan dioda zener dengan nilai V_z yang paling mendekati, yaitu 3,6V dari dioda zener tipe 1N4685[17].

Transistor yang digunakan pada sistem ini adalah transistor BJT tipe 2N5088, tipe ini merupakan *General Purpose BJT NPN* dan beroperasi pada daya yang rendah[18]. Resistor R_1 pada rangkaian regulator tegangan ini berfungsi untuk mengatur arus yang mengaktifkan dioda zener D_1 , besar R_1 dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.20 dari Subbab 2.6. Pada kasus ini, nilai dari I_b sangat kecil dengan skala mikro-ampere dan dapat diabaikan. Sehingga, nilai dari R_1 adalah sebagai berikut,

$$R_1 = \frac{V_{in} - V_z}{I_z + I_b}$$

Nilai I_b diabaikan, $I_b \approx 0$

$$R_1 = \frac{V_{in} - V_z}{I_z}$$

$$I_z = \frac{V_{in} - V_z}{R_1}$$

$V_{in} = 4,6\text{V}$; $V_z = 3,6\text{V}$; $R_1 = 1\text{k}\Omega$

$$I_z = \frac{4,6 - 3,6}{1000}$$

$$I_z = 1 \text{ mA}$$

Pada sistem ini V_{in} adalah tegangan masukan yang berasal dari superkapasitor sebesar 4,6V pada kondisi terisi penuh dan akan berkurang secara linier pada proses pengosongan, besarnya tegangan dari superkapasitor ini akan dibahas lebih lanjut pada Subbab 3.3. Dengan menetapkan nilai R_1 sebesar 1 k Ω , maka didapat arus dioda zener I_z sebesar 1mA. Pada *datasheet*, nilai I_z minimum adalah 50 μA [17], maka dengan nilai R_1 sebesar 1 k Ω didapat nilai I_z yang cukup untuk mengaktifkan dioda zener.

Sesuai *datasheet*, dioda zener tidak akan mampu memberikan tegangan referensi ketika nilai $I_z < 50\mu\text{A}$, kondisi tersebut merupakan kondisi *cut-off*, yaitu saat tegangan yang masuk dari superkapasitor tidak dapat lagi diregulasi. Dengan memasukkan nilai *cut-off* ini ke Persamaan 2.20, didapatkan rumusan tegangan *cut-off* sebagai berikut,

$$R_1 = \frac{V_{in} - V_z}{I_z + I_b}$$

nilai I_b diabaikan, $I_b \approx 0$, maka nilai I_z menjadi

$$I_z = \frac{V_{in} - V_z}{R_1}$$

pada kondisi *cut-off*, persamaan berubah menjadi,

$$I_{z \min} = \frac{V_{cut-off} - V_z}{R_1}$$

melalui substitusi, tegangan *cut-off* adalah sebagai berikut,

$$V_{cut-off} = I_{z \min} R_1 + V_z$$

dengan nilai $I_{z \min} = 50\mu\text{A}$; $R_1 = 1\text{k}\Omega$; $V_z = 3,6\text{V}$; maka,

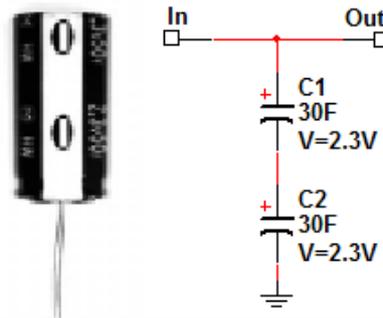
$$V_{cut-off} = (5 \cdot 10^{-5})(1000) + (3,6)$$

$$V_{cut-off} = 3,65\text{V}$$

Oleh karena itu, nilai tegangan masukkan minimum untuk regulator ini adalah sebesar 3,65V. Hal ini berarti saat tegangan masukkan berada di bawah 3,65V, regulator ini tidak mampu lagi untuk memberikan tegangan keluaran sebesar 3V.

3.3 Superkapasitor

Pada skripsi ini media penyimpanan energi yang digunakan adalah superkapasitor dan tipe superkapasitor yang digunakan adalah EDLHW306D2R3R keluaran CDE Cornell Dubilier[13]. Gambar 3.4 menunjukkan bentuk dari fisik dari superkapasitor dan susunannya pada sistem ini.



Gambar 3.4 Superkapasitor EDLHW306D2R3R dan konfigurasiya

Besar kapasitansi dari superkapasitor ini adalah 30F dengan rating tegangan sebesar 2,3V. Untuk sistem ini, kapasitor tersebut dirangkai seri sebanyak dua buah, hal tersebut dilakukan untuk menambah rating tegangan dari superkapasitor, sehingga total tegangan yang mampu ditampung oleh superkapasitor menjadi dua kali lipat sebesar 4,6V. Dengan menyerikan dua buah superkapasitor nilai kapasitansi akan berubah sesuai dengan Persamaan 2.17 di Subbab 2.5,

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

untuk dua kapasitor, maka,

$$C_t = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

karena, $C_1 = C_2 = C$, maka,

$$C_t = \frac{C}{2}$$

nilai kapasitansi $C = 30F$, sehingga,

$$C_t = \frac{30}{2}$$

$$C_t = 15F$$

nilai kapasitansi total dari superkapasitor pada sistem ini adalah 15F.

Dengan menggunakan Persamaan 2.15 dari Subbab 2.5, lamanya waktu *back-up* dari superkapasitor adalah.

$$t = C \frac{\Delta V}{I}$$

$$C = 15F; \Delta V = 4,6V - 3,65V = 0,95V; I = 1mA,$$

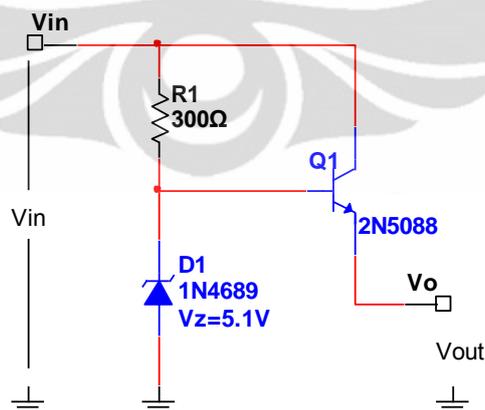
$$t = (15) \frac{0,95}{(1 \times 10^{-3})}$$

$$t = 14250s \text{ (3,9 jam)}$$

ΔV merupakan selisih antara tegangan maksimum superkapasitor dengan tegangan *cut-off*, dimana tegangan *cut-off* telah ditentukan sebesar 3,65V dan tegangan maksimum dari superkapasitor sebesar 4,6V sesuai dengan pengaturan pada Blok Regulator Superkapasitor, blok tersebut akan dibahas lebih lanjut pada Subbab 3.4. Nilai I merupakan besarnya arus *discharge* dari superkapasitor, nilai I akan diasumsikan sebesar 1mA berdasarkan dari konsumsi arus yang dibutuhkan oleh Blok Regulator Beban. Sehingga, waktu *back-up* dari sistem ini adalah sebesar 3,9 jam.

3.4 Regulator Superkapasitor

Regulator tegangan ini berfungsi untuk menjaga agar tegangan pada saat proses *charging* superkapasitor tidak melebihi tegangan rating dari superkapasitor. Regulator tegangan ini memiliki susunan yang sama seperti regulator beban pada Subbab 3.2, yang berbeda hanyalah tegangan keluarannya. Tegangan keluaran dari regulator ini adalah 4,6V; mengacu pada tegangan rating dari superkapasitor. Gambar 3.5 menunjukkan rangkaian dari regulator superkapasitor,



Gambar 3.5 Regulator Tegangan Superkapasitor

Untuk mendapatkan tegangan keluaran sebesar 4,6V; maka digunakan dioda zener tipe 1N4689 dengan tegangan zener sebesar 5,1V. Masukkan dari regulator ini berasal panel surya dan keluarannya menuju superkapasitor.

3.5 Panel Surya

Pada sistem ini digunakan panel surya sebagai sumber daya, panel surya yang digunakan terdiri dari susunan beberapa sel surya. Sel surya tersebut disusun secara seri untuk mendapatkan tegangan yang cukup untuk menjalankan sistem. Gambar 3.6 menunjukkan bentuk fisik dari sel surya yang digunakan pada sistem ini.



Gambar 3.6 Panel Surya

Melalui percobaan didapat rata-rata tegangan *open-circuit* dan arus *short-circuit* dari sel surya adalah sebesar 2,6V dan 44mA. Pada sistem ini untuk mendapatkan tegangan superkapasitor sebesar 4,6V maka dibutuhkan tegangan masukan yang lebih besar dari nilai tegangan superkapasitor tersebut, kelebihan tegangan ini juga berfungsi untuk mengurangi pengaruh fluktuasi tegangan panel surya akibat variasi radiasi cahaya matahari. Untuk sistem ini, dipilih tegangan masukan dari panel surya sebesar 8V. Sesuai dengan Persamaan 2.13, banyaknya sel surya yang perlu disusun seri adalah,

$$N_{series} = \frac{V_{output}}{0,9V_{oc}}$$

$$N_{series} = \frac{(8)}{(0,9)(2)}$$

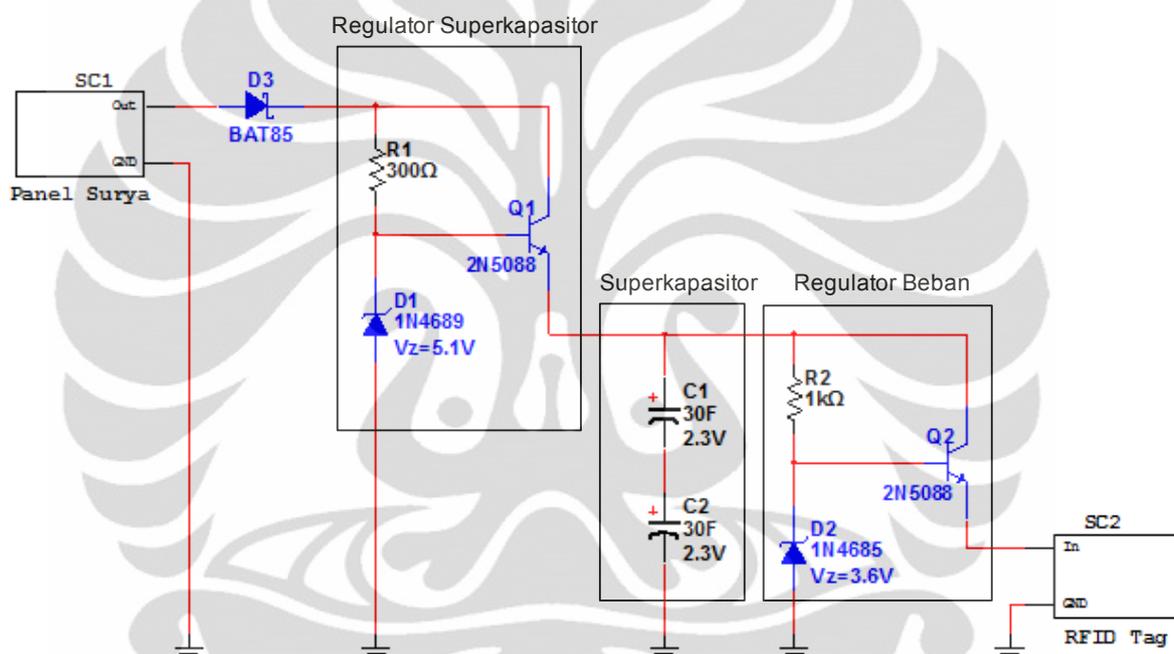
$$N_{series} = 4,44$$

Dengan demikian, jumlah sel surya yang dibutuhkan adalah empat buah dengan disusun seri. Penyusunan sel surya secara paralel untuk meningkatkan arus tidak dilakukan karena alasan ekonomi, selain itu, penambahan arus tersebut tidak krusial

terhadap jalannya sistem. Besarnya arus dari panel surya hanya akan mempengaruhi lamanya waktu *charging*, dan arus sebesar 44mA sudah mencukupi untuk melakukan proses *charging*.

3.6 Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Tenaga Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi

Gambar 3.7 menunjukkan keseluruhan sistem sumber daya tag aktif RFID berbasis tenaga surya.



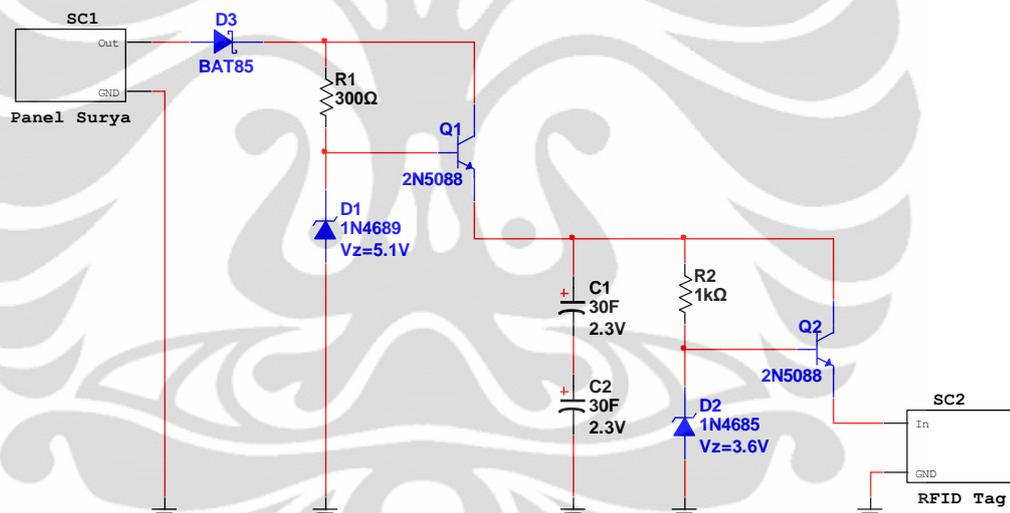
Gambar 3.7 Sistem Sumber Daya Tag Aktif Rfid Berbasis Tenaga Surya Dengan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi

Secara garis besar sistem ini diawali dengan pembangkitan tegangan dan arus oleh panel surya. Arus dan tegangan tersebut kemudian dipakai untuk mengisi superkapasitor dengan tegangan maksimal pengisian diatasi sesuai dengan tegangan rating superkapasitor. Setelah superkapasitor terisi penuh, tegangan dari panel surya akan langsung menyuplai beban dengan terlebih dahulu melalui proses penyesuaian tegangan melalui rangkaian regulator beban. Ketika panel surya tidak mampu lagi memberikan suplai daya karena tidak adanya cahaya, superkapasitor mulai melakukan proses *discharge* dan menjadi sumber daya cadangan hingga panel surya mampu memberikan suplai daya lagi. Pada panel surya dipasang dioda schottky BAT85 untuk mencegah agar tidak ada arus yang mengalir balik ke dalam panel surya.

BAB 4

SIMULASI

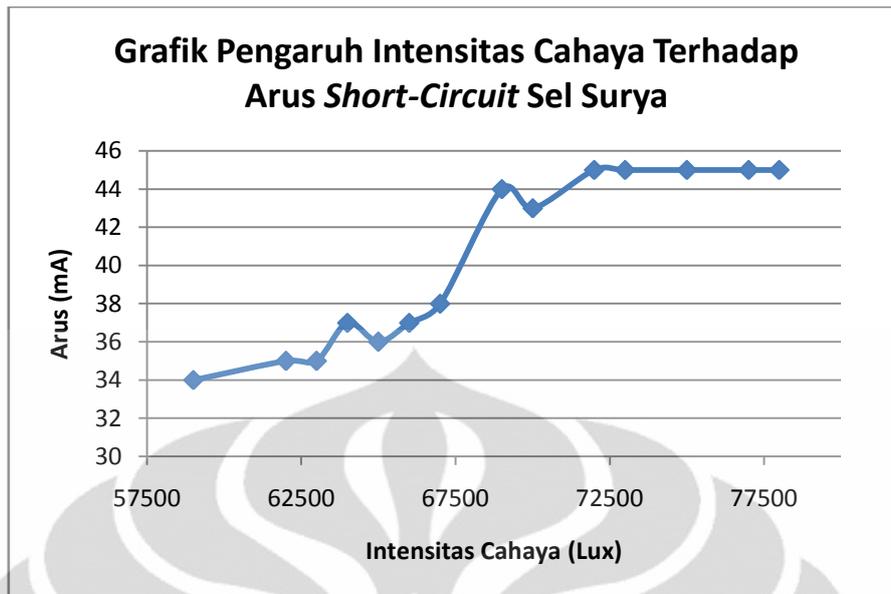
Pada skripsi ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* NI Multisim 11.0 dengan *tools* yang digunakan adalah *DC Sweep* dan *Transient Analysis*. Komponen yang dipakai dalam simulasi disesuaikan dengan komponen yang akan dipakai pada purwarupa, blok Tag RFID akan dimodelkan dengan menggunakan Resistor $16k\Omega$ untuk menyesuaikan impedansi dari Tag RFID yang sebelumnya telah diuji karakteristiknya dan didapat karakteristik tegangan dan arus sebesar $2,85V$ dan $0,16mA$; Superkapasitor akan dimodelkan dengan komponen kapasitor elektrolit yang telah disediakan oleh NI Multisim 11.0, dan pemodelan panel surya akan dibahas pada Subbab 4.1. Gambar 4.1 menunjukkan rangkaian yang digunakan untuk simulasi.



Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi

4.1 Pemodelan Panel Surya

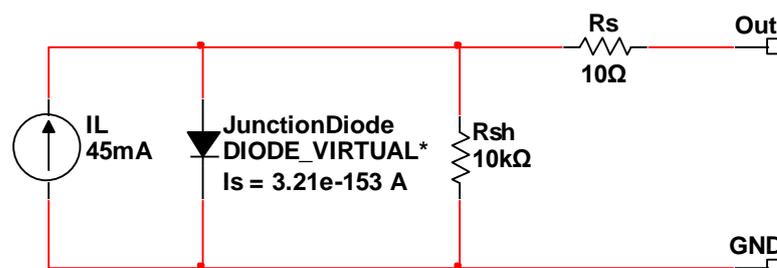
Sebelum dilakukan simulasi akan dilakukan pemodelan terhadap karakteristik sel surya. Pemodelan ini akan didasarkan pada pengumpulan data karakteristik sel surya yang digunakan pada skripsi ini. Dari data didapat tegangan keluaran sel surya bernilai konstan sebesar $9V$ pada kisaran intensitas cahaya sebesar 59.000 lux. – 78.000 lux., sedangkan nilai arus akan berbanding lurus dengan besarnya intensitas cahaya, Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan arus sel surya terhadap besarnya intensitas cahaya matahari.



Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Arus *Short Circuit* Sel Surya

Dari grafik dapat dilihat bahwa arus *short-circuit* berbanding lurus dengan intensitas cahaya. Arus yang muncul berkisar antara 34mA hingga 45mA, pada intensitas cahaya mulai dari 59.000 lux hingga 77.500 lux. Pada intensitas cahaya diatas 70.000 lux, nilai arus *short-circuit* konstan pada 45mA. Oleh karena itu, parameter yang dipakai untuk pemodelan sel surya adalah 45mA sebagai nilai arus *short-circuit* (I_{sc}) dan 9V untuk nilai tegangan *open-circuit* (V_{oc}).

Rangkaian ganti sel surya pada pemodelan ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada model ini terdapat empat parameter, yang pertama adalah *Series Resistance* R_s , hambatan ini muncul dari kontak metal dan hambatan dalam sel surya itu sendiri, parameter yang kedua adalah R_{sh} atau *Shunt Resistance* yang menggambarkan cacat yang ada pada struktur kristal sel surya, dan parameter ketiga adalah dioda yang menggambarkan *PN Junction* pada sel surya, parameter yang terakhir, yaitu sumber arus yang mewakili arus fotonik yang dibangkitkan dengan cahaya matahari.



Gambar 4.3 Rangkaian ganti sel surya

Untuk mendapatkan karakteristik yang sesuai ($V_{oc} = 9V$, $I_{sc} = 45mA$) dilakukan penyesuaian parameter dengan menggunakan Persamaan 2.10 dari Subbab 2.3. Parameter yang sudah diketahui adalah: V_{oc} sebesar 9V, I_{sc} sebesar 45mA, dan nilai $\frac{k_B T}{q}$ yang merupakan *Thermal Voltage* (V_T) dengan nilai sebesar 0,02586V pada temperatur 27°C. Parameter yang belum diketahui untuk memodelkan sel surya adalah parameter I_0 atau *Saturation Current* dari *Junction Diode*, nilai I_0 dapat dicari dengan menurunkan Persamaan 2.10.

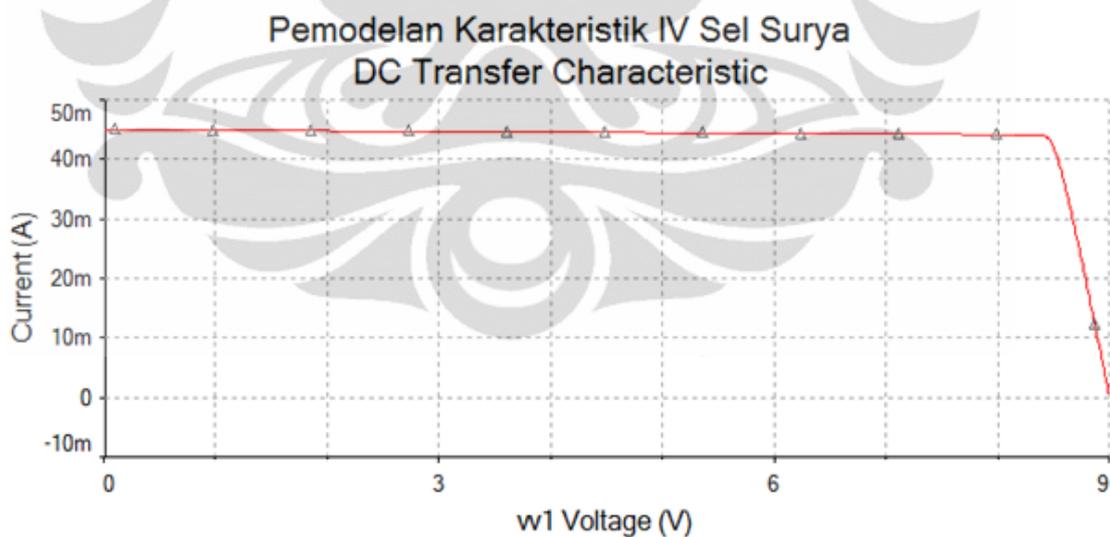
$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_T} \right) - 1} \quad ; \quad V_T = \frac{k_B T}{q}$$

$$I_0 = \frac{45}{\exp \left(\frac{9}{0,02586} \right) - 1}$$

$$I_0 = 3,2 \times 10^{-150} \text{ mA}$$

Nilai R_s dan R_{sh} ditentukan masing-masing sebesar 10Ω dan 10kΩ. Dengan parameter tersebut didapatkan grafik pemodelan karakteristik sel surya melalui *tools DC Sweep* pada NI Multisim 11.0.

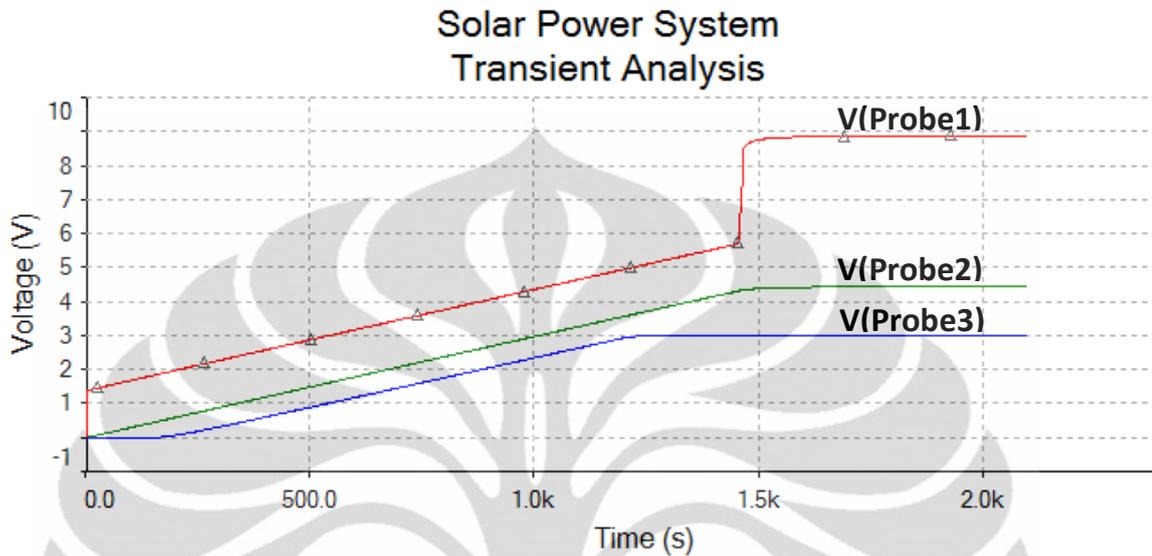


Gambar 4.4 Pemodelan Karakteristik IV Sel Surya

4.2 Simulasi Proses *Charging*

Simulasi proses *Charging* dilakukan menggunakan *tools Transient Analysis* dari NI Multisim 11.0. Pada simulasi yang pertama, akan diamati parameter tegangan

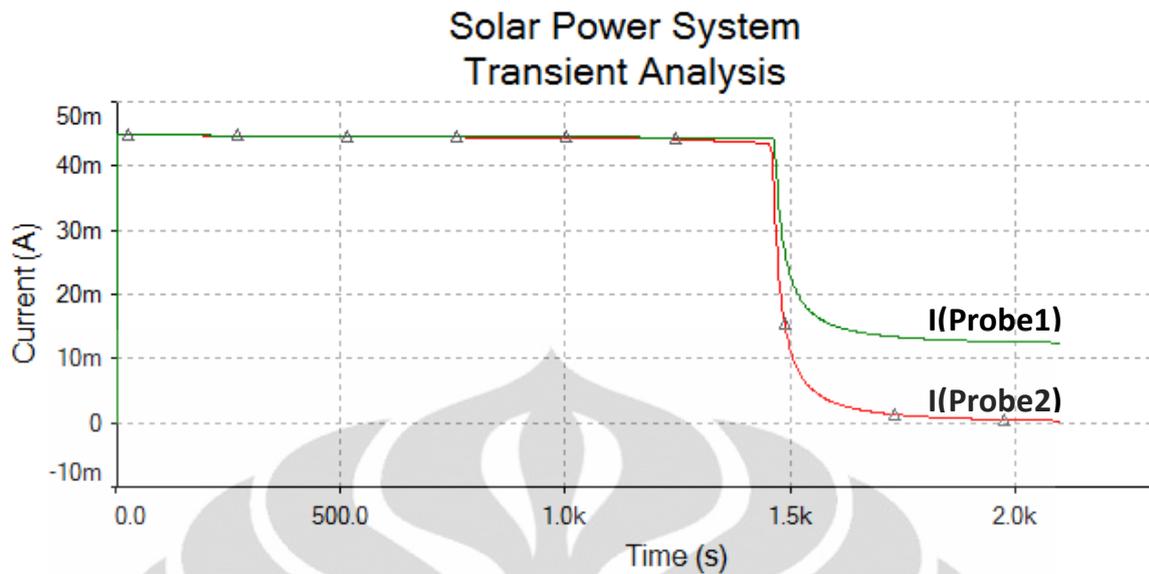
pada sel surya, superkapasitor dan tegangan keluaran yang akan dikorelasikan dengan waktu sehingga menghasilkan grafik $V(\text{tegangan})$ vs $t(\text{waktu})$. Gambar 4.5 menunjukkan hasil simulasi proses *charging*.



Gambar 4.5 Grafik Tegangan vs Waktu hasil simulasi proses *charging*

$V(\text{Probe1})$ adalah tegangan dari sel surya, $V(\text{Probe2})$ adalah tegangan pada superkapasitor, dan $V(\text{Probe3})$ adalah tegangan keluaran. Dari grafik terlihat bahwa regulator tegangan superkapasitor dibatasi pada nilai 4,6V dan tegangan keluaran berhasil di regulasi pada 3V. Pada tegangan sel surya terjadi fenomena yang menarik, dimana tegangan dari sel surya tidak langsung menuju ke tegangan keluaran seperti pada saat *open-circuit* (V_{oc}) tetapi naik secara linier dari 1,5V ke tegangan V_{oc} 9V seiring dengan berjalannya waktu mengikuti proses *charging* superkapasitor. Dari hasil simulasi ini dapat dilihat bahwa kapasitor terisi penuh saat tegangan mencapai 4,6V dalam jangka waktu 1.500 detik atau 25 menit.

Selain simulasi hubungan antara tegangan dengan waktu, akan disimulasikan hubungan antara arus dengan waktu, hasilnya akan tampak seperti pada Gambar 4.6,

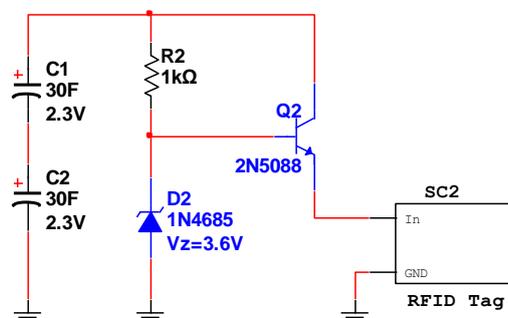


Gambar 4.6 Grafik Arus vs Waktu hasil simulasi proses *charging*

$I(Probe1)$ adalah arus sel surya dan $I(Probe2)$ adalah arus yang masuk ke superkapasitor. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada saat proses *charging* besarnya arus yang dikonsumsi oleh superkapasitor akan mendekati nilai arus yang dihasilkan oleh sel surya. Namun pada saat superkapasitor sudah terisi penuh, arus yang mengalir ke superkapasitor akan berkurang hingga nol, begitu juga dengan arus yang dihasilkan oleh sel surya, terjadi pengurangan arus yang muncul dari sel surya pada saat superkapasitor sudah terisi penuh.

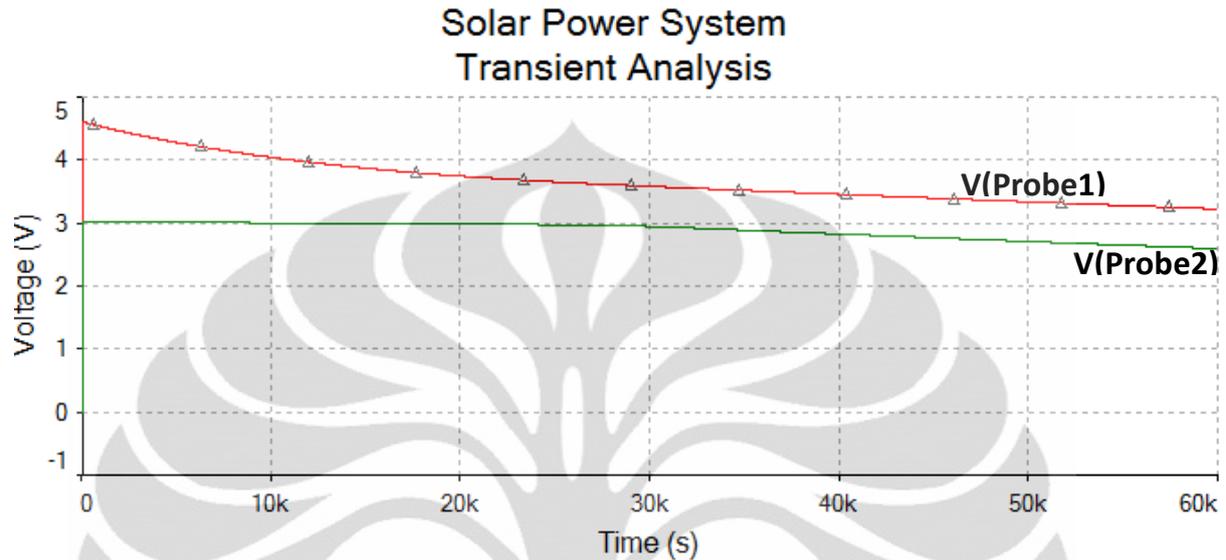
4.3 Simulasi Proses *Discharging*

Proses *discharging* dimulai pada saat sel surya sudah tidak lagi memberikan suplai listrik, maka dari itu rangkaian untuk simulasi proses *discharging* akan berubah menjadi seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Rangkaian simulasi proses *discharging*

Pada simulasi ini akan diamati perubahan tegangan yang terjadi dan juga berapa lama waktu *backup* dari superkapasitor. Gambar 4.8 menunjukkan hasil simulasi proses *discharging*.



Gambar 4.8 Hasil simulasi proses *discharging*

$V(Probe1)$ adalah tegangan pada superkapasitor dan $V(Probe2)$ tegangan keluaran. Dari grafik terlihat bahwa nilai tegangan dari superkapasitor akan berkurang seiring dengan waktu. Tegangan keluaran akan tetap terjaga konstan pada saat awal proses *discharging*, namun ketika tegangan dari superkapasitor sudah tidak mencukupi untuk melakukan regulasi tegangan, maka tegangan keluaran juga akan menurun sedikit demi sedikit mengikuti penurunan dari tegangan superkapasitor.

BAB 5

UJI COBA DAN ANALISIS

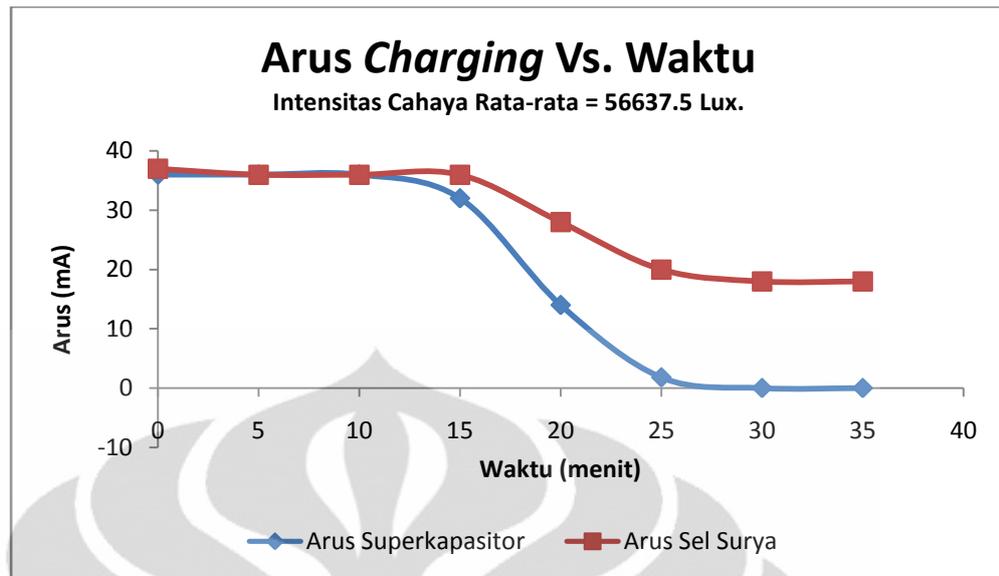
Prototipe dari sistem sumber daya tag aktif RFID berbasis tenaga surya dengan superkapasitor sebagai media penyimpan energi dibuat pada material *Printed Circuit Board* (PCB) diletakan pada rangka yang terbuat dari material *acrylic*, gambar dari prototipe sistem dapat dilihat di lampiran, prototipe sistem memiliki ukuran 7cm x 13cm x 4cm. Sistem ini telah berhasil menyuplai daya untuk Tag Aktif RFID M100 dari RFCode, tetapi ukuran prototipe yang masih relatif besar, sehingga masih dibutuhkan riset lebih lanjut agar sistem ini dapat diimplementasikan pada kondisi di lapangan.

5.1 Kondisi Tanpa Beban

Pada bagian ini akan dilakukan pengukuran dengan kondisi sistem tidak diberi beban. Pengukuran akan ditujukan untuk dua proses, yaitu proses *charging* dan *discharging*.

5.1.1 *Charging* Tanpa Beban

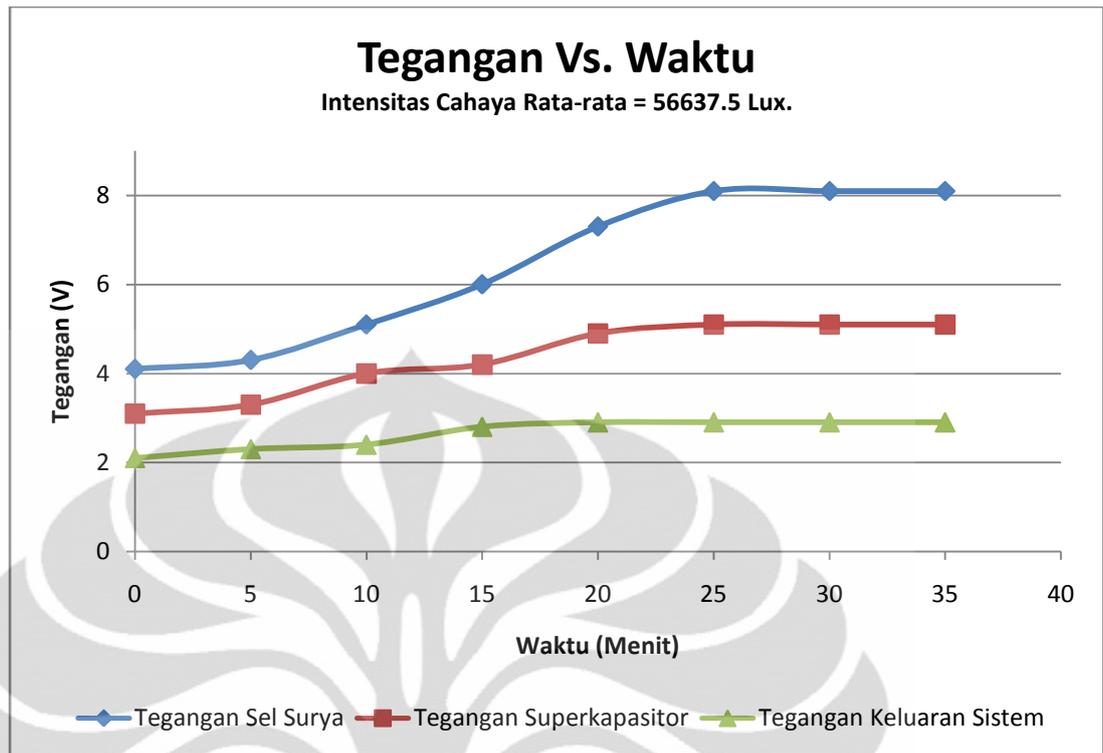
Parameter yang diamati pada pengukuran ini adalah parameter intensitas cahaya, tegangan, arus, dan waktu. Data diambil dengan selang waktu selama 5 menit dengan data tegangan yang diambil adalah tegangan panel surya, tegangan superkapasitor dan tegangan keluaran, sedangkan data arus yang diambil adalah arus panel surya dan arus *charging* superkapasitor, pengambilan data dilakukan pada intensitas cahaya rata-rata sebesar 56.637,5 Lux. dengan panel surya diposisikan secara tegak lurus terhadap bumi. Gambar 5.1 menunjukkan grafik arus panel surya dan arus *charging* superkapasitor yang dihubungkan terhadap waktu.



Gambar 5.1 Grafik arus *charging* terhadap waktu

Melalui pengujian ini didapatkan karakteristik arus dari superkapasitor saat proses *charging*. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai arus yang masuk ke superkapasitor akan mendekati nilai arus yang dihasilkan oleh panel surya pada awal proses *charging*. Namun, ketika superkapasitor sudah mendekati kondisi terisi penuh, arus pada superkapasitor akan berkurang menghasilkan selisih antara arus dari panel surya dengan arus yang masuk ke superkapasitor. Saat superkapasitor terisi penuh, arus yang masuk ke superkapasitor bernilai nol, nilai ini menunjukkan bahwa superkapasitor tidak mampu lagi menampung muatan. Dari grafik juga terlihat bahwa pada saat superkapasitor terisi penuh, terjadi penurunan arus yang dihasilkan oleh panel surya yang mengindikasikan adanya pergeseran titik operasi panel surya.

Selain arus, pada pengujian ini juga dilakukan pengamatan terhadap tegangan. Gambar 5.2 menunjukkan grafik tegangan panel surya, tegangan superkapasitor dan tegangan keluaran sistem terhadap waktu.

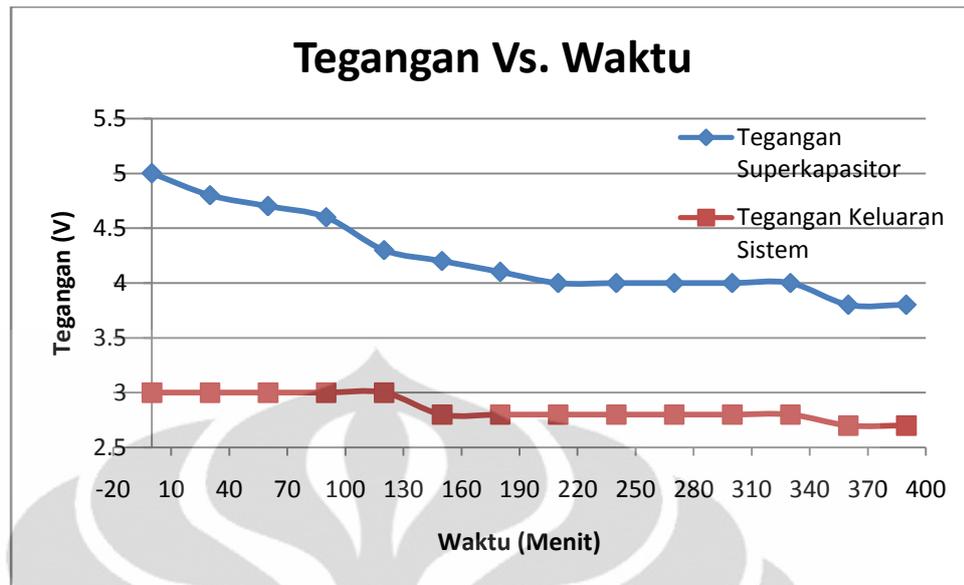


Gambar 5.2 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses *charging*

Dari grafik dapat dilihat bahwa regulator tegangan untuk superkapasitor dan regulator tegangan keluaran sistem mampu menjaga kestabilan tegangan walaupun terjadi *error* dari nilai yang diharapkan pada perancangan. Pada perancangan, nilai dari batas tegangan superkapasitor adalah 4,6V; namun pada pengujian di lapangan didapat nilai batas tegangan adalah 5,1V; menyimpang 0,5V atau 10,87% dari desain. Pada pengujian ini tegangan keluaran sistem berhasil diregulasi pada 2,9V dengan nilai *error* sebesar 0,1V atau menyimpang 3,45% dari desain.

5.1.2 *Discharging* Tanpa Beban

Parameter yang diamati pada pengujian ini adalah tegangan dari superkapasitor dan tegangan keluaran sistem pada saat proses *discharging* tanpa adanya beban pada terminal keluaran sistem. Gambar 5.3 menunjukkan grafik proses *discharging* dari superkapasitor.



Gambar 5.3 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses *discharging*

Dari grafik dapat dilihat bahwa tegangan dari superkapasitor akan menurun pada saat tidak ada tegangan masukan dari panel surya. Penurunan tegangan ini menunjukkan adanya konsumsi daya oleh regulator tegangan walaupun tidak terhubung dengan beban. Selain itu, kebocoran muatan listrik pada superkapasitor juga menjadi salah satu faktor penyebab penurunan tegangan. Pengujian ini menunjukkan bahwa pada kondisi tidak terbebani, tegangan keluaran sistem dapat dijaga pada kisaran 2,7V – 3V selama kurun waktu 360 menit atau 6 jam.

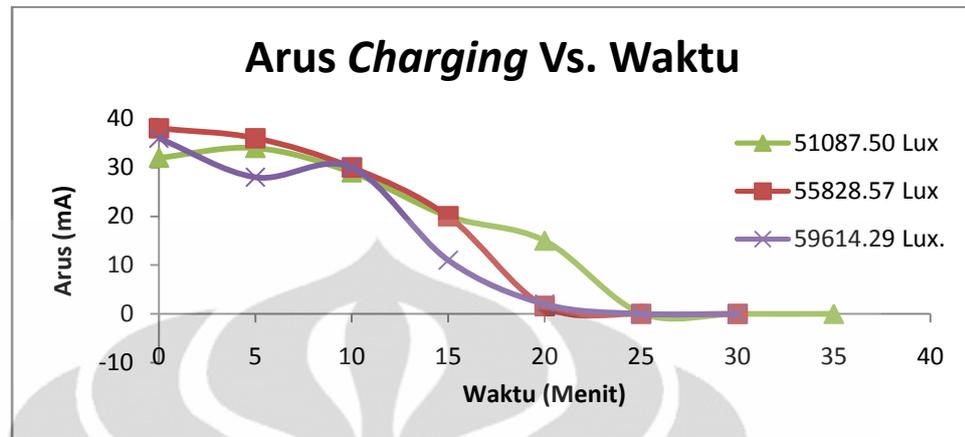
5.2 Kondisi Dengan Beban (16k Ω)

Pada bagian ini akan dilakukan pengujian dengan kondisi sistem terbebani. Beban yang digunakan adalah resistor dengan nilai resistansi sebesar 16k Ω untuk menggantikan Tag Aktif RFID. Pengukuran akan ditujukan untuk dua proses, yaitu proses *charging* dan *discharging*.

5.2.1 *Charging* Dengan Beban (16k Ω)

Pada bagian ini akan dilakukan pengujian pengisian superkapasitor pada tiga nilai rata-rata intensitas cahaya, yaitu 51.087,50 Lux; 55.828,87 Lux; dan 59614,29 Lux. Parameter yang diujii adalah arus *charging* superkapasitor, tegangan superkapasitor, dan tegangan keluaran. Gambar 5.4 sampai dengan

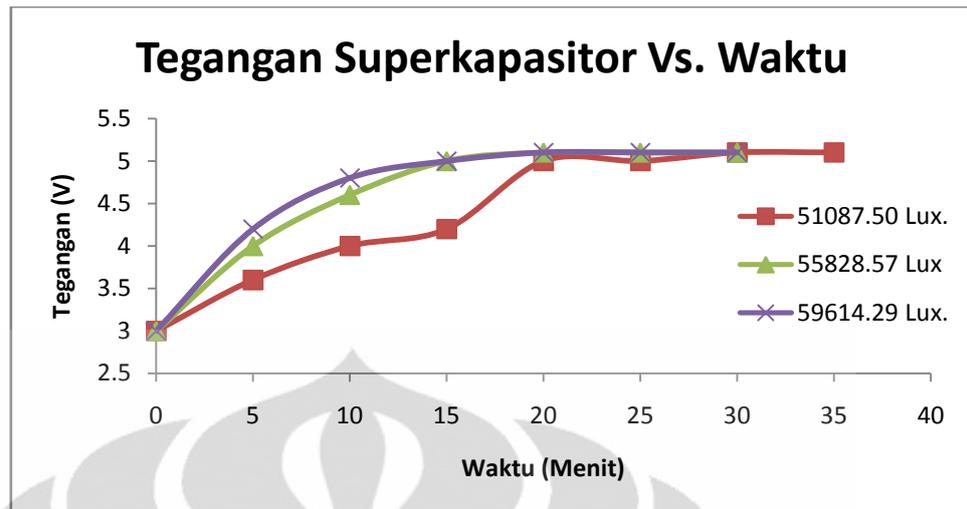
Gambar 5.6 menunjukkan hasil pengujian proses *charging* dengan beban $16k\Omega$.



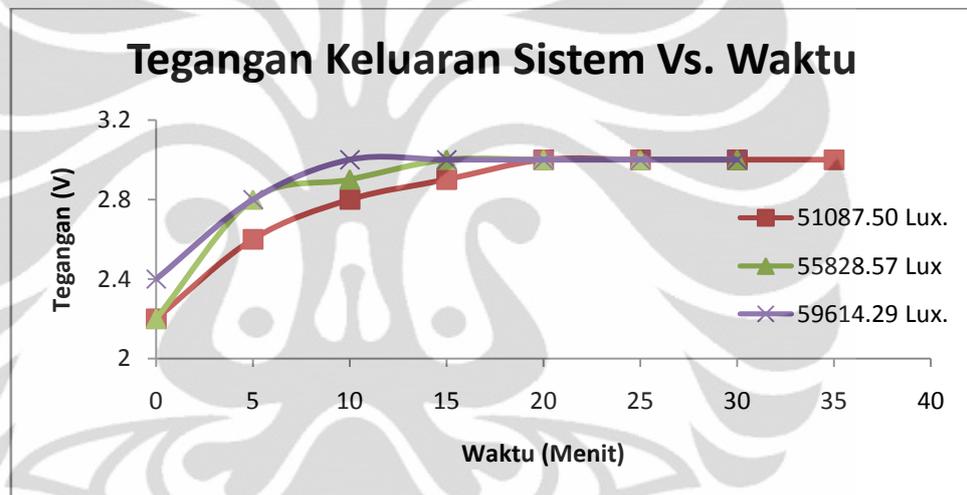
Gambar 5.4 Grafik arus superkapasitor terhadap waktu pada proses *charging* dengan beban

Seperti telah disebutkan pada Subbab 5.1.1, superkapasitor dapat dikatakan telah terisi penuh pada saat arus yang masuk ke dalam superkapasitor tersebut telah bernilai nol atau dengan kata lain sudah tak ada lagi muatan yang dapat ditampung oleh superkapasitor. Dari grafik terlihat bahwa semakin besar nilai intensitas cahaya maka proses pengisian superkapasitor akan semakin cepat, fluktuasi dari besarnya arus yang masuk ke superkasitor disebabkan oleh adanya fluktuasi intensitas cahaya yang berimbang pada nilai arus yang dibangkitkan oleh panel surya. Waktu *charging* untuk masing-masing nilai rata-rata intensitas cahaya adalah 35 menit untuk intensitas rata-rata sebesar 51.087,50 Lux; 30 menit untuk intensitas rata-rata sebesar 55.828,87 Lux; dan 30 menit untuk intensitas rata-rata sebesar 59.614,29 Lux. Lama waktu *charging* pada intensitas rata-rata 59.614,29 Lux tidak lebih cepat dari kondisi intensitas rata-rata 55.828,87 Lux, hal tersebut terjadi karena tingginya temperatur yang berakibat pada berkurangnya performa panel surya.

Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 menunjukkan grafik tegangan terhadap waktu pada proses *charging* dengan beban.



Gambar 5.5 Grafik tegangan superkapasitor terhadap waktu pada proses *charging* dengan beban

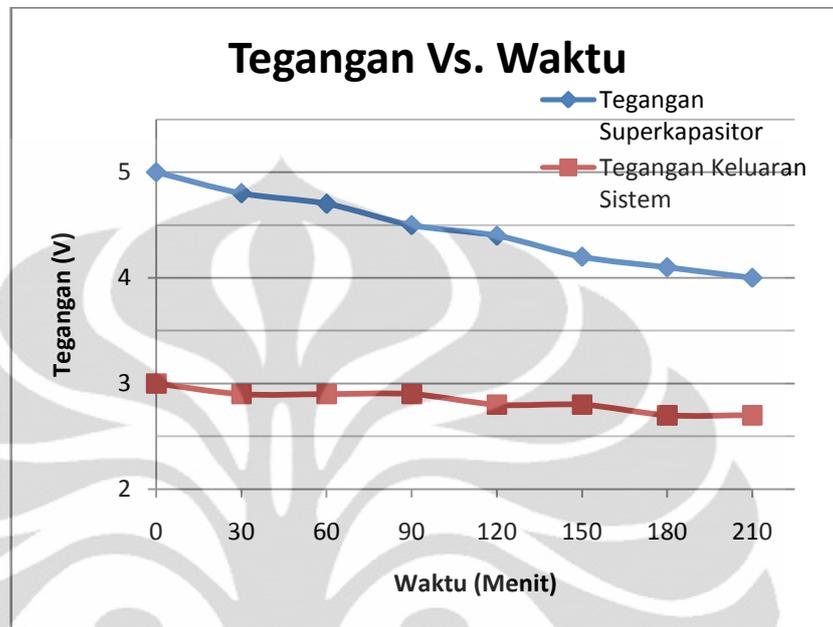


Gambar 5.6 Grafik tegangan keluaran sistem terhadap waktu pada proses *charging* dengan beban

Dari Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi intensitas cahaya, maka akan semakin cepat tegangan mencapai nilai maksimum, yaitu 5,1V untuk tegangan superkapasitor dan 3V untuk tegangan keluaran sistem. Pada superkapasitor terjadi *error* pembatasan tegangan, yaitu sebesar 0,5V atau 10,87% dari desain, namun untuk tegangan keluaran, nilai yang dicapai telah sesuai dengan target, yaitu 3V.

5.2.2 Discharging Dengan Beban (16k Ω)

Gambar 5.7 menunjukkan grafik proses *discharging* dengan beban 16k Ω .



Gambar 5.7 Grafik tegangan terhadap waktu pada proses *discharging* dengan beban

Dari data didapati bahwa tegangan keluaran sistem menurun dari 3V ke 2,7V dalam selang waktu 150 menit atau 2,5 jam. Hal tersebut menunjukkan bahwa superkapasitor hanya mampu memberikan *backup* daya selama 2,5 jam; menyimpang dari perancangan, yaitu 3,9 jam; atau menyimpang sebanyak 35,90% dari desain.

5.3 Kondisi Dengan Beban (Tag RFID)

Pada bagian ini akan dilakukan pengukuran dengan kondisi sistem diberi beban Tag Aktif RFID. Tag Aktif yang digunakan adalah Tag Aktif Keluaran RFCODE dengan tipe M100 yang akan dibaca menggunakan *reader* RFID tipe M200 keluaran RFCODE menggunakan piranti lunak MobileTrak Lite. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan terminal daya dari tag ke terminal keluaran sistem sel surya, melalui software MobileTrak Lite, tag dapat dideteksi. Pada bagian ini akan diuji pendeteksian tag oleh *reader* pada saat superkapasitor melakukan proses *discharging*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.1.

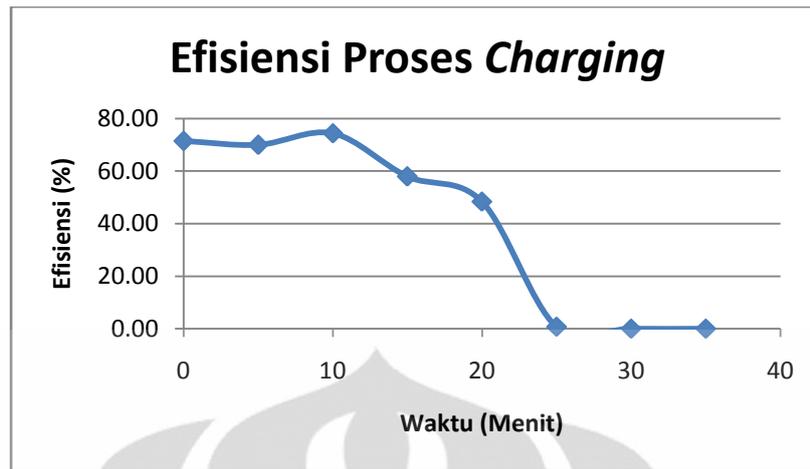
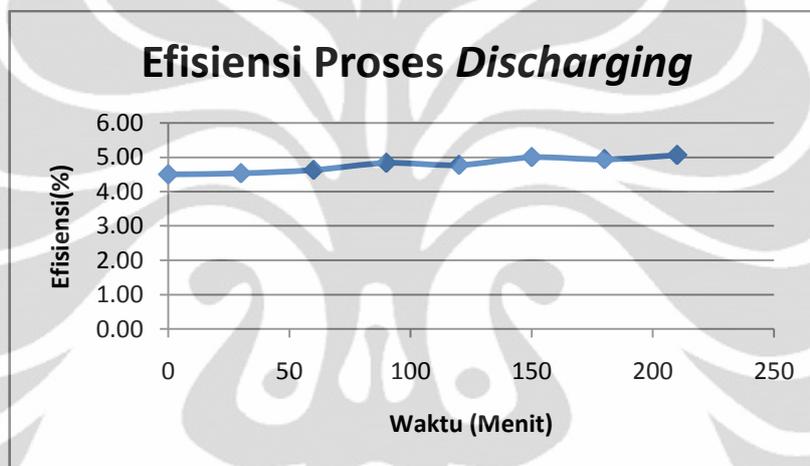
Tabel 5.1 Proses *discharging* dengan beban Tag RFID

t (menit)	V_{cap} (V)	V_{out} (V)	Event
0	5,1	3	No Event
5	5,1	3	No Event
10	5,1	3	No Event
15	5,1	3	No Event
20	5,1	3	No Event
25	5,1	3	No Event
30	5	2,9	No Event
35	5	2,9	No Event
40	5	2,9	No Event
45	5	2,9	No Event
50	5	2,9	No Event
55	5	2,9	No Event
60	5	2,9	No Event
65	4,8	2,8	Low Battery Warning
70	4,8	2,8	Low Battery Warning
75	4,8	2,8	Low Battery Warning

V_{cap} adalah tegangan dari superkapasitor, dan V_{out} adalah tegangan keluaran dari sistem. Tabel 5.1 menunjukkan bahwa Tag RFID dapat beroperasi pada saat superkapasitor memiliki tegangan sebesar 5,1V masih dapat terus beroperasi secara normal hingga tegangan superkapasitor turun ke 4,8V dalam jangka waktu 60 menit. Pada menit ke 65, pembacaan pada *reader* menunjukkan peringatan *Low Battery Warning*, peringatan tersebut muncul pada saat tegangan superkapasitor bernilai 4,8V dan tegangan keluaran sistem menunjukkan nilai 2,8V. Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa superkapasitor dapat mem-*backup* aktivitas Tag RFID selama 60 menit, selain itu dapat juga disimpulkan bahwa tegangan minimum yang dibutuhkan oleh Tag RFID adalah 2,8V.

5.4 Efisiensi

Pada bagian ini akan dibahas efisiensi dari sistem, efisiensi yang dibahas adalah efisiensi pada saat pengisian superkapasitor dan efisiensi dari daya keluaran sistem. Efisiensi dari proses pengisian superkapasitor dapat dilihat dari grafik pada Gambar 5.8 dan efisiensi proses *discharging* dapat dilihat pada Gambar 5.9. Grafik efisiensi proses *charging* didapat dari data percobaan *charging* dengan beban 16k Ω pada kondisi intensitas cahaya 51.087,50 Lux.

Gambar 5.8 Grafik efisiensi proses *charging*Gambar 5.9 Grafik efisiensi proses *discharging*

Dari grafik dapat dilihat bahwa efisiensi dari pengisian superkapasitor berkurang seiring dengan waktu. Pada kondisi awal pengisian, superkapasitor akan mengkonsumsi arus yang besar untuk mengisi muatan, saat muatan superkapasitor sudah terisi penuh, maka superkapasitor akan mengkonsumsi arus yang lebih sedikit. Pada grafik di Gambar 5.1 telah terlihat bahwa pada saat superkapasitor mendekati kondisi terisi penuh maka akan tercipta selisih antara arus yang dihasilkan oleh panel surya dengan arus yang masuk ke superkapasitor, selisih tersebutlah yang menyebabkan adanya penurunan efisiensi. Selisih arus tersebut menggambarkan arus yang terbuang, arus yang terbuang tersebut muncul dari konsumsi arus oleh dioda zener. Grafik efisiensi dari proses *discharging* dapat dilihat pada Gambar 5.9, nilai dari efisiensi berkisar antara 4% hingga 5%. Rugi-rugi yang muncul pada sistem ini berasal dari konsumsi arus oleh dioda zener pada regulator beban.

BAB 6

KESIMPULAN

1. Sistem panel surya dengan superkapasitor sebagai penyimpan energi dapat digunakan sebagai sumber daya untuk tag aktif RFID M100 keluaran RFCODE.
2. Superkapasitor dapat memberikan cadangan daya untuk menjaga tegangan keluaran sistem pada 3V dengan lama waktu *back-up* sebanyak 360 menit untuk kondisi tanpa beban, 150 menit untuk kondisi dengan beban resistor 16k Ω , dan 60 menit untuk kondisi dengan beban tag aktif RFID M100 keluaran RFCODE.
3. Kecepatan *charging* dari superkapasitor berbanding lurus dengan besarnya intensitas cahaya yang didapat oleh panel surya, waktu *charging* dengan menggunakan beban resistor 16k Ω adalah 35 menit untuk intensitas cahaya rata-rata sebesar 51.087,50 Lux; 30 menit untuk intensitas cahaya rata-rata sebesar 55.828,87 Lux; dan 30 menit untuk intensitas cahaya rata-rata sebesar 59.614,29 Lux.
4. Efisiensi dari proses *charging* superkapasitor berkisar antara 0% hingga 75,47%, nilai efisiensi 75,47% didapat pada saat awal proses pengisian superkapasitor dimana superkapasitor mengkonsumsi arus maksimum dan nilai efisiensi 0% didapat saat muatan superkapasitor terisi penuh dimana superkapasitor tidak lagi mengkonsumsi arus.
5. Efisiensi dari proses *discharging* dengan beban 16k Ω berkisar antara 4,50% hingga 5,06%, rugi-rugi yang muncul berasal dari konsumsi arus pada dioda zener.

DAFTAR ACUAN

- [1] <http://www.esdm.go.id/news-archives/56-artikel/3347-pemanfaatan-energi-surya-di-indonesia.html>
- [2] Green, Martin. A. 1998. *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*, pp. 5. Prentice Hall, New Jersey.
- [3] Green, Martin. A. 1998. *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*, pp. 5. Prentice Hall, New Jersey.
- [4] Nelson, Jenny. 2003. *The Physics Of Solar Cells*, pp. 1. Imperial College, UK
- [5] Nelson, Jenny. 2003. *The Physics Of Solar Cells*, pp. 7. Imperial College, UK
- [6] Castaner, Luis and Silvestre, Santiago. 2002. *Modelling Photovoltaics Systems Using Pspice*, pp. 24. John Wiley and Sons, West Sussex
- [7] Nelson, Jenny. 2003. *The Physics Of Solar Cells*, pp. 9. Imperial College, UK
- [8] Green, Martin. A. 1998. *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*, pp. 79. Prentice Hall, New Jersey.
- [9] Nelson, Jenny. 2003. *The Physics Of Solar Cells*, pp. 12. Imperial College, UK
- [10] Singh, Jasprit. 1995. *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*, pp. 358. McGraw-Hill, Singapore.
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor
- [12] A.K. Shukla, S. Sampath and K. Vijayamohan. *Electrochemical Supercapacitor : Energy Storage Beyond Batteries*, Current Science, Vol. 79, No. 12, 25 December 2000
- [13] CDE Cornell Dubilier, "Electric Double Layer Supercapacitors"
- [14] Boylestad, Robert L and Nashelsky, Louis. 2006. *Electronic Devices and Circuit Theory, 7th Ed.* pp. 792. Pearson-Prentice Hall, New Jersey.
- [15] RfCode, "M100 Asset Tag"
- [16] Energizer, "CR2032"
- [17] On Semiconductor, "1N4678 Series"
- [18] Fairchild Semiconductor, "2N5088 NPN General Purpose Amplifier"

DAFTAR PUSTAKA

- A.K. Shukla, S. Sampath and K. Vijayamohan. *Electrochemical Supercapacitor : Energy Storage Beyond Batteries*, Current Science, Vol. 79, No. 12, 25 December 2000
- Boylestad, Robert L and Nashelsky, Louis. 2006. *Electronic Devices and Circuit Theory*, 7th Ed. Pearson-Prentice Hall, New Jersey.
- Castaner, Luis and Silvestre, Santiago. 2002. *Modelling Photovoltaics Systems Using Pspice*. John Wiley and Sons, West Sussex
- Green, Martin. A. 1998. *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*. Prentice Hall, New Jersey.
- Nelson, Jenny. 2003. *The Physics Of Solar Cells*. Imperial College, UK
- Rushi Vyas, Vasileios Lakafosis, Zisis Konstas, and Manos M. Tentzeris. *Design and Characterization of a Novel Battery-less, Solar Powered Wireless Tag for Enhanced-Range Remote Tracking Applications*. Proceedings of the 39th European Microwave Conference, 29 September - 1 October 2009. Rome, Italy
- Singh, Jasprit. 1995. *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*. McGraw-Hill, Singapore.

LAMPIRAN

Data Karakterisasi

1. Tag Aktif RFID

Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro
Hari/Tanggal : Rabu/8 Juni 2011
Waktu : 09.00 – 10.00
Keterangan : V_{tag} = Tegangan Tag ; I_{tag} = Arus Tag

No.	V_{tag} (mA)	I_{tag} (mA)
1	2,85	0,16
2	2,85	0,16
3	2,85	0,16
4	2,85	0,16
5	2,85	0,16
6	2,85	0,16
7	2,85	0,16
8	2,85	0,16

2. Panel Surya

Tempat : Lapangan Kontainer Departemen Teknik Elektro
Hari/Tanggal : Sabtu/3 Juni 2011
Waktu : 09.00 – 10.00
Keterangan : V_{oc} = Tegangan *open-circuit*; I_{sc} = Arus *short-circuit*

Jumlah Sel = 1

Intensitas Cahaya (Lux.)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)
63000	2,6	40
64000	2,6	42
65000	2,6	43
66000	2,6	44
68500	2,6	44
69000	2,6	44
69400	2,6	44
70000	2,6	44

Jumlah Sel = 4 Seri

Intensitas Cahaya (Lux.)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)
59000	9	34
62000	9	35
63000	9	35
64000	9	37
65000	9	36
66000	9	37
67000	9	38
69000	9	44
70000	9	43
72000	9	45
73000	9	45
75000	9	45
77000	9	45
78000	9	45

Data Charging Tanpa Beban

Tempat : Lapangan Kontainer Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Senin/30 Mei 2011
 Waktu : 11.00
 Keterangan : V_{ps} = Tegangan panel surya; I_{ps} = Arus panel surya; V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; I_{cap} = Arus Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran

t (menit)	Int. Cahaya (lux)	V_{ps} (V)	I_{ps} (mA)	V_{cap} (V)	I_{cap} (mA)	V_{out} (V)
0	55000	4,1	37	3,1	36	2,1
5	43000	4,3	36	3,3	36	2,3
10	55000	5,1	36	4	36	2,4
15	54000	6	36	4,2	32	2,8
20	62100	7,3	28	4,9	14	2,9
25	58000	8,1	20	5,1	1,8	2,9
30	65000	8,1	18	5,1	0	2,9
35	61000	8,1	18	5,1	0	2,9
Rata-rata=	56637.5					

Data Discharging Tanpa Beban

Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Senin/23 Mei 2011
 Waktu : 11.00
 Keterangan : V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran

t (menit)	V_{cap} (V)	V_{out} (V)
0	5	3
30	4,8	3
60	4,7	3
90	4,6	3
120	4,3	3
150	4,2	2,8
180	4,1	2,8
210	4	2,8
240	4	2,8
270	4	2,8
300	4	2,8
330	4	2,8
360	3,8	2,7
390	3,8	2,7

Data Charging Dengan Beban (16kΩ)

Tempat : Lapangan Kontainer Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Selasa/31 Mei 2011
 Waktu : 10.00
 Keterangan : V_{ps} = Tegangan panel surya; I_{ps} = Arus panel surya; V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; I_{cap} = Arus Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran; I_{out} = Arus keluaran

t (menit)	Int. Cahaya (lux)	V_{ps} (V)	I_{ps} (mA)	V_{cap} (V)	I_{cap} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)
0	67200	4,5	38	3	38	2,2	0,14
5	50800	5,3	36	4	36	2,8	0,16
10	62400	8,5	30	4,6	30	2,9	0,16
15	58000	7,2	30	5	20	3	0,16
20	60900	8,2	20	5,1	1,6	3	0,17
25	49200	8	18	5,1	0	3	0,17
30	42300	8	17	5,1	0	3	0,17
Rata-rata =	55828,57						

Pengolahan Data

t (menit)	P_{sc} (mW)	P_{cap} (mW)	P_{out} (mW)	η_{cap} (%)	η_{out} (%)
0	171	114	0,308	66,67	0,18
5	190,8	144	0,448	75,47	0,23
10	255	138	0,464	54,12	0,18
15	216	100	0,48	46,30	0,22
20	164	8,16	0,51	4,98	0,31
25	144	0	0,51	0	0,35
30	136	0	0,51	0	0,38

P_{sc} = Daya Solar Cell; P_{cap} = Daya Superkapasitor; P_{out} = Daya Keluaran Sistem

η_{cap} = Efisiensi Pengisian Superkapasitor; η_{out} = Efisiensi Keluaran Sistem

$$P_{sc} = V_{sc} I_{sc} \quad ; \quad P_{cap} = V_{cap} I_{cap} \quad ; \quad P_{out} = V_{out} I_{out}$$

$$\eta_{cap} = \frac{P_{cap}}{P_{sc}} 100\% \quad ; \quad \eta_{out} = \frac{P_{out}}{P_{sc}} 100\%$$

Tempat : Lapangan Kontainer Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Kamis/2 Juni 2011
 Waktu : 14.00
 Keterangan : V_{ps} = Tegangan panel surya; I_{ps} = Arus panel surya; V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; I_{cap} = Arus Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran; I_{out} = Arus keluaran

t (menit)	Int. Cahaya (lux)	V_{ps} (V)	I_{ps} (mA)	V_{cap} (V)	I_{cap} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)
0	55500	4,2	32	3	32	2,2	0,15
5	60000	5	35	3,6	34	2,6	0,15
10	57000	5,2	30	4	29	2,8	0,15
15	47200	5,8	25	4,2	20	2,9	0,15
20	56000	6,2	25	5	15	3	0,16
25	44000	7,2	15	5	0,15	3	0,16
30	50000	8	15	5,1	0	3	0,16
35	39000	7,8	7	5,1	0	3	0,16
Rata-rata =	51087,50						

Pengolahan Data

t (menit)	P_{sc} (mW)	P_{cap} (mW)	P_{out} (mW)	η_{cap} (%)	η_{out} (%)
0	134,4	96	0,33	71,43	0,25
5	175	122,4	0,39	69,94	0,22
10	156	116	0,42	74,36	0,27
15	145	84	0,435	57,93	0,30
20	155	75	0,48	48,39	0,31
25	108	0,75	0,48	0,69	0,44
30	120	0	0,48	0	0,40
35	54,6	0	0,48	0	0,88

P_{sc} = Daya Solar Cell; P_{cap} = Daya Superkapasitor; P_{out} = Daya Keluaran Sistem

η_{cap} = Efisiensi Pengisian Superkapasitor; η_{out} = Efisiensi Keluaran Sistem

$$P_{sc} = V_{sc} I_{sc} \quad ; \quad P_{cap} = V_{cap} I_{cap} \quad ; \quad P_{out} = V_{out} I_{out}$$

$$\eta_{cap} = \frac{P_{cap}}{P_{sc}} 100\% \quad ; \quad \eta_{out} = \frac{P_{out}}{P_{sc}} 100\%$$

Tempat : Lapangan Kontainer Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Senin/6 Juni 2011
 Waktu : 11.00
 Keterangan : V_{ps} = Tegangan panel surya; I_{ps} = Arus panel surya; V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; I_{cap} = Arus Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran; I_{out} = Arus keluaran

t (menit)	Int. Cahaya (lux)	V_{ps} (V)	I_{ps} (mA)	V_{cap} (V)	I_{cap} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)
0	70300	4,4	36	3	36	2,4	0,14
5	57000	5,4	30	4,2	28	2,8	0,15
10	53000	6	34	4,8	30	3	0,15
15	53000	7	25	5	11	3	0,15
20	49000	8	16	5,1	2	3	0,15
25	65000	8,4	15	5,1	0	3	0,15
30	70000	8,4	14	5,1	0	3	0,15
Rata-rata =	59614,29						

Pengolahan Data

P_{sc} = Daya Solar Cell; P_{cap} = Daya Superkapasitor; P_{out} = Daya Keluaran Sistem

η_{cap} = Efisiensi Pengisian Superkapasitor; η_{out} = Efisiensi Keluaran Sistem

t (menit)	P_{sc} (mW)	P_{cap} (mW)	P_{out} (mW)	η_{cap} (%)	η_{out} (%)
0	158,4	108	0,336	68,18	0,21
5	162	117,6	0,42	72,59	0,26
10	204	144	0,45	70,59	0,22
15	175	55	0,45	31,43	0,26
20	128	10,2	0,45	7,97	0,35
25	126	0	0,45	0	0,36
30	117,6	0	0,45	0	0,38

$$P_{sc} = V_{sc} I_{sc} \quad ; \quad P_{cap} = V_{cap} I_{cap} \quad ; \quad P_{out} = V_{out} I_{out}$$

$$\eta_{cap} = \frac{P_{cap}}{P_{sc}} 100\% \quad ; \quad \eta_{out} = \frac{P_{out}}{P_{sc}} 100\%$$

Data Discharging Dengan Beban (16kΩ)

Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Selasa/24 Mei 2011
 Waktu : 13.00
 Keterangan : V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran;
 I_{out} = Arus keluaran

t (menit)	V_{cap} (V)	I_{cap} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)
0	5	2	3	0,15
30	4,8	2	2,9	0,15
60	4,7	2	2,9	0,15
90	4,5	2	2,9	0,15
120	4,4	2	2,8	0,15
150	4,2	2	2,8	0,15
180	4,1	2	2,7	0,15
210	4	2	2,7	0,15

Pengolahan Data

P_{cap} = Daya Superkapasitor; P_{out} = Daya Keluaran Sistem

η_{out} = Efisiensi Keluaran Sistem

t (menit)	P_{cap} (mW)	P_{out} (mW)	η_{out} (%)
0	10	0,45	4,50
5	9,6	0,44	4,53
10	9,4	0,44	4,63
15	9	0,44	4,83
20	8,8	0,42	4,77
25	8,4	0,42	5,00
30	8,2	0,41	4,94

$$P_{cap} = V_{cap} I_{cap}$$

$$P_{out} = V_{out} I_{out}$$

$$\eta_{out} = \frac{P_{out}}{P_{sc}} 100\%$$

Data Discharging Dengan Beban (Tag RFID)

Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro
 Hari/Tanggal : Rabu/8 Juni 2011
 Waktu : 11.00
 Reader : RFCode M200, 433MHz
 Jarak Reader – Tag : 30cm
 Keterangan : V_{cap} = Tegangan Superkapasitor; V_{out} = Tegangan keluaran

t (menit)	V_{cap} (V)	V_{out} (V)	Jumlah <i>Beacon</i>	Deteksi	<i>Event</i>
0	5,1	3	0	ya	<i>No Event</i>
5	5,1	3	35	ya	<i>No Event</i>
10	5,1	3	62	ya	<i>No Event</i>
15	5,1	3	85	ya	<i>No Event</i>
20	5,1	3	112	ya	<i>No Event</i>
25	5,1	3	141	ya	<i>No Event</i>
30	5	2,9	170	ya	<i>No Event</i>
35	5	2,9	184	ya	<i>No Event</i>
40	5	2,9	209	ya	<i>No Event</i>
45	5	2,9	239	ya	<i>No Event</i>
50	5	2,9	264	ya	<i>No Event</i>
55	5	2,9	286	ya	<i>No Event</i>
60	5	2,9	305	ya	<i>No Event</i>
65	4,8	2,8	313	ya	<i>Low Battery Warning</i>
70	4,8	2,8	344	ya	<i>Low Battery Warning</i>
75	4,8	2,8	357	ya	<i>Low Battery Warning</i>

Dokumentasi Foto

**Sistem Sumber Daya Tag Aktif RFID Berbasis Sel Surya Dengan Superkapasitor
Sebagai Media Penyimpan Energi**



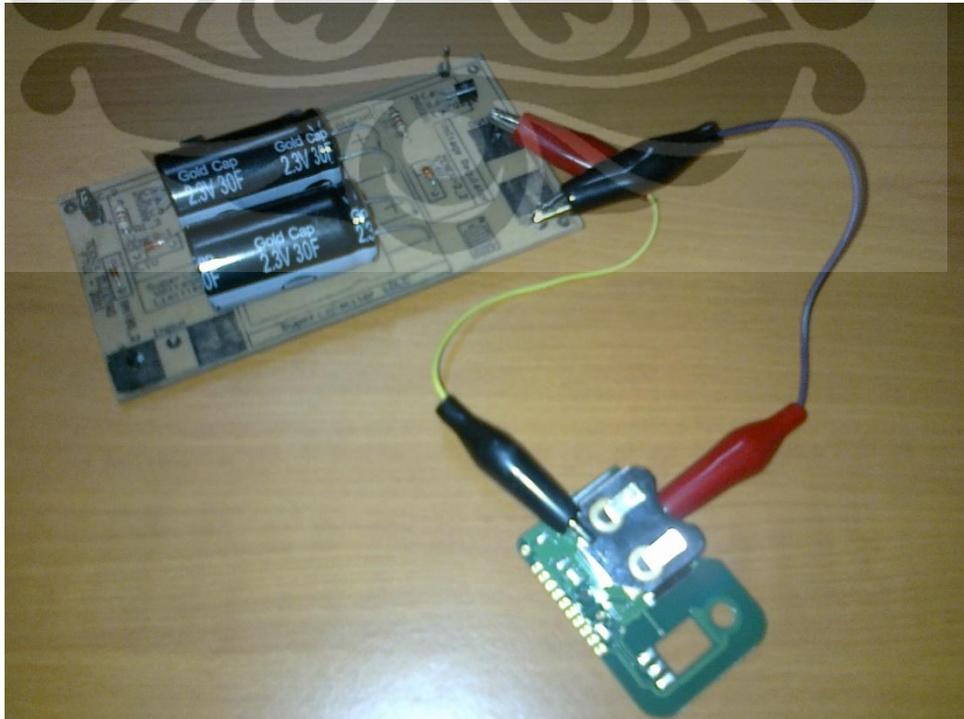
Pengujian Proses *Charging*

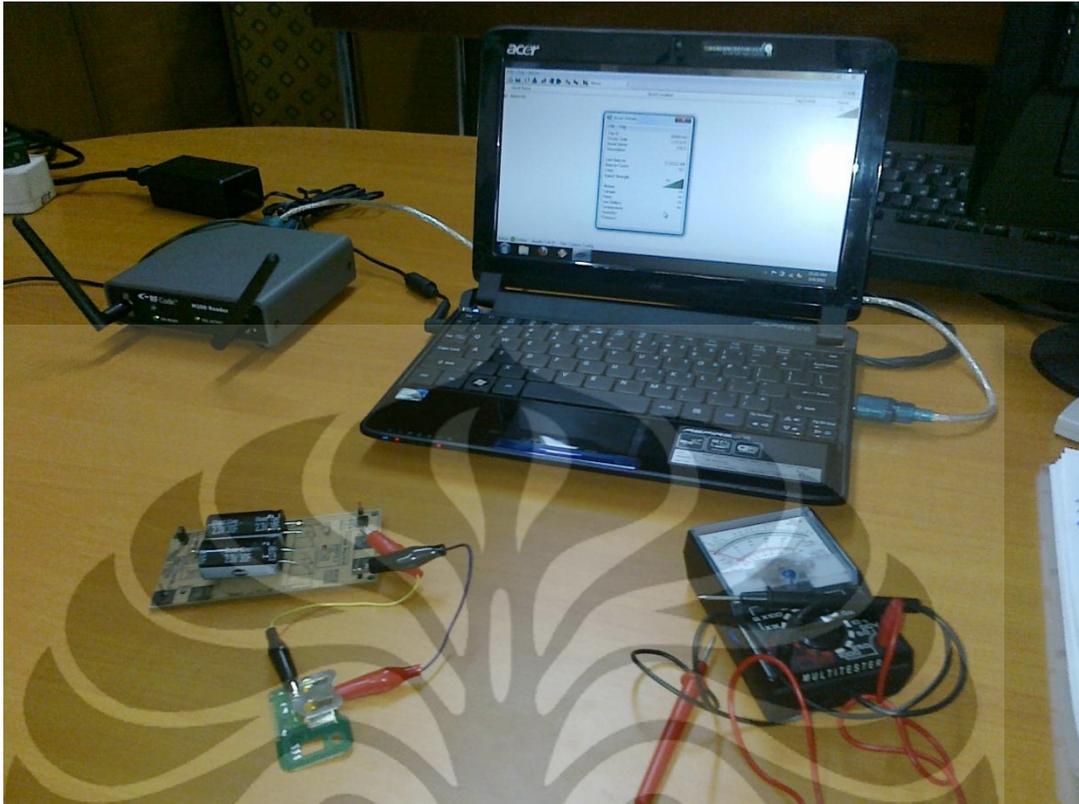


Pengujian Karakteristik Tag RFID

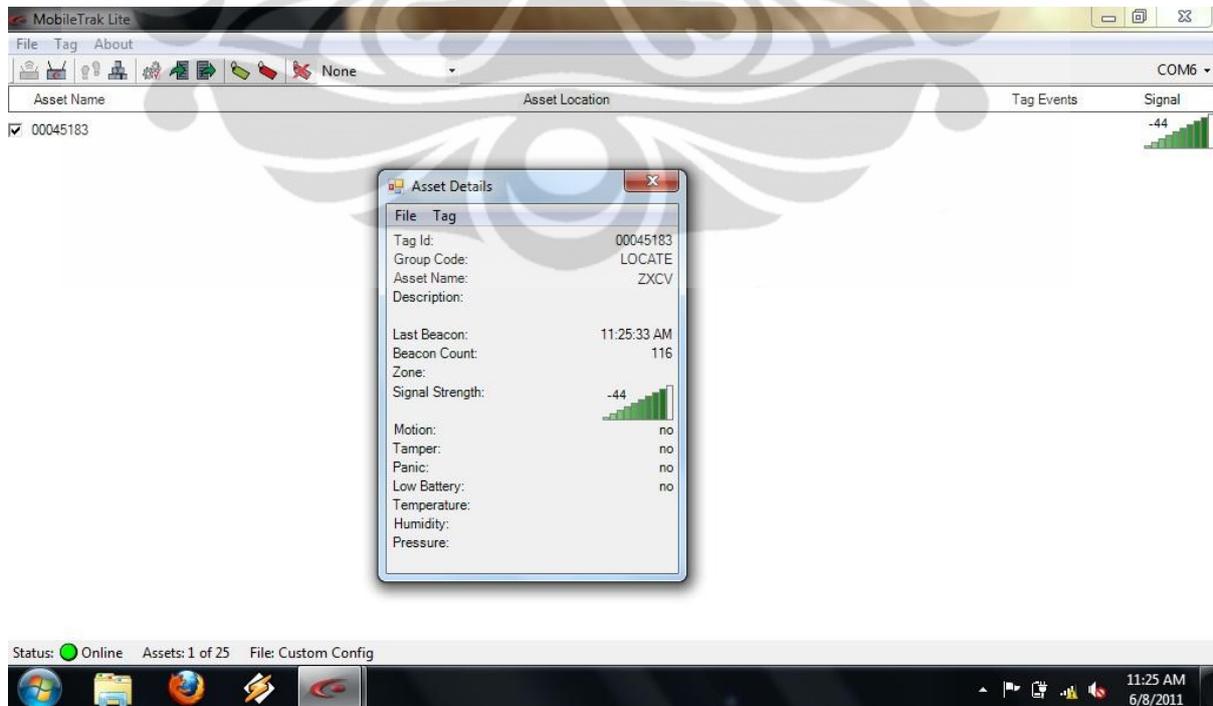


Pengujian Karakteristik Panel Surya





Pengujian Dengan Beban Tag RFID



Hasil Pembacaan Tag RFID