



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALI PENGISIAN
ARUS SEL SURYA DENGAN REKONFIGURASI
SERI-PARALEL**

SKRIPSI

**MONTARIO CHANDRA BUWONO
0806366081**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALI PENGISIAN
ARUS SEL SURYA DENGAN REKONFIGURASI
SERI-PARALEL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MONTARIO CHANDRA BUWONO
0806366081**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Montario Chandra Buwono

NPM : 0806366081

Tanda Tangan :



Tanggal : 17 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Montario Chandra Buwono
NPM : 0806366081
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel

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 : Ir. Purnomo Sidi Priambodo, Msc, Ph.D

(*P. Priambodo*)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, MT

(*N. Poespawati*)

Penguji : Dr. Abdul Halim, M.Eng

(*A. Halim*)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Januari 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur yang setinggi-tingginya saya panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

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

selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing saya dalam penyusunan skripsi ini;

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 17 Desember 2010

Penulis

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

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

Nama : Montario Chandra Buwono
NPM : 0806366081
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 Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALI PENGISIAN ARUS SEL
SURYA DENGAN REKONFIGURASI SERI-PARALEL**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 17 Desember 2010

Yang menyatakan

(Montario Chandra Buwono)

Montario Chandra Buwono
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.sc, Ph.D

Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Paralel-Seri

ABSTRAK

Skripsi ini merancang bangun sistem pengisian arus sel surya dengan performan rekonfigurasi dua buah sel surya yang disusun berdasarkan kombinasi hubungan seri-paralel, dari paralel ke seri atau sebaliknya untuk mendapatkan efisiensi konversi energi listrik dari penyerapan energi matahari yang intensitasnya berubah-ubah. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian performansi pengisian arus yang diharapkan tidak melebihi batasan karakterisasi sel surya, yaitu 3,5A. Selain itu merancang pengendalian pembatasan pengisian arus ke baterai pada saat baterai sudah penuh, yang diindikasikan dengan tegangan baterai sebesar 12,8V. Hal ini diperlukan, karena perlindungan terhadap baterai sebagai penyimpan energi listrik sangat penting dari *over charging* untuk menjaga umur pemakaian baterai. Sistem ini menggunakan suatu rangkaian *switching regulator* untuk menstabilkan keluaran sel surya yang tidak stabil, serta meningkatkan fleksibilitas desain yaitu menghasilkan tegangan keluaran jamak dari polaritas yang berbeda-beda dari sebuah tegangan masukan tunggal untuk masukan pengisian baterai. Selain itu, sistem ini terdiri dari rangkaian *voltage divider*, opamp komparator, dan *relay driver*. *Voltage divider* mengkonversi tegangan sel surya dan baterai untuk keperluan masukan kontrol komparator sebagai *sensing* sinyal untuk pengendalian sistem. *Relay driver* mengontrol hubungan penyaklaran baterai untuk *charging* atau *discharging*, dan penyaklaran rekonfigurasi paralel-seri sel surya. Sistem ini menggunakan baterai sebagai catu daya.

Kata kunci : sel surya, *charger controller*, baterai, *driver switch*, *switching regulator*.

Montario Chandra Buwono
Electrical Engineering Departement

Consultant Lecturer
Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.sc, Ph.D

Design Build of Solar Cell Current Energy Charger System with Series-Parallel Connectivity Reconfiguration

ABSTRACT

This research study related to design and build solar cell current energy charger with two solar cell reconfiguration performance in order of connectivity of series-parallel combination, from parallel connectivity to series connectivity or otherwise to get efficiency electrical energy conversion from illumination sunlight energy absorption that had variable intensity. In this research study also performance testing or calibrate for current charging which is not over ligation for the solar cell characteristic is meaning 3,5A. Beside that, the research have in order to build current charger controller to battery when the battery is full of current, that indicate with battery voltage have 12,8V. This is important because to protect the battery from overcharging to get a long life time used. This system used switching regulator circuit to stabilized the unstabil output solar cell, and to increase flexibility of design, that are can generate plural output voltage from different polarity single input as used battery charger input. Than the system consist of voltage divider circuit, comparator, and relay driver. Voltage divider have to convert solar cell voltage and battery voltage to used as input of comparator as signal sensing to control system. Relay driver have to control switch connectivity of charging or discharging the battery and series-parallel reconfiguration of solar cell. This system use the battery as a power.

Keyword : solar cell, charge controller, battery, driver switch, switching regulator.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Skripsi.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 DASAR TEORI	4
2.1 Sel surya (<i>Solar Cell</i>).....	4
2.1.1 Cara kerja sel surya.....	5
2.1.2 Parameter sel surya	11
2.1.2.1 Kurva Karakteristik Sel Surya.....	11
2.1.2.2 Arus <i>Short Circuit</i> (<i>Isc</i>) dan Tegangan <i>Open Circuit</i> (<i>Voc</i>).....	13
2.1.2.3 <i>Fill Factor</i>	15
2.1.2.4 Karakteristik Efisiensi Energi.....	15
2.1.3 Rangkaian Seri dan Pararel Sel Surya.....	16
2.1.3.1 Konfigurasi Sel surya.....	16
2.2 <i>Switching Regulator</i>	16
2.2.1 Hukum Induktansi.....	17
2.2.2 <i>Buck Regulator</i>	18
2.2.3 Metode Perancangan <i>Switching Regulator</i>	22
2.3 Baterai (Akumulator)	28
2.3.1 Reaksi Kimia Baterai.....	29
2.3.2 Prinsip kerja Baterai.....	30
2.3.3 Jenis-jenis Baterai.....	31
2.4 Komparator Operational Amplifier (Op-Amp).....	32
2.5 LM324.....	34
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	36
3.1 Deskripsi Sistem.....	36
3.2 Perancangan Sistem.....	37
3.2.1 Sel Surya.....	38

3.2.2	Rangkaian Switching Regulator.....	39
3.2.3	Rangkaian Kontrol Komparator <i>Charge/discharge</i> Baterai..	42
3.2.4	Rangkaian Kontrol Komparator Rekonfigurasi Seri-paralel Sel surya	44
3.2.5	Rangkaian Relay Driver.....	45
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS		50
4.1	Deskripsi Pengujian dan Analisis.....	50
4.2	Target Pengujian.....	50
4.3	Pengujian	50
4.3.1	Daftar Peralatan dan Bahan Pengujian.....	50
4.3.2	Konfigurasi Pengujian.....	51
4.3.2.1	Konfigurasi Pengujian Sel Surya.....	51
4.3.2.2	Konfigurasi Pengujian Switching Regulator.....	52
4.3.2.3	Konfigurasi Pengujian sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dan charge/discharge baterai	53
4.3.2.4	Konfigurasi Pengujian Sistem	55
4.4	Analisis Data Sistem.....	55
4.4.1	Analisis Rangkaian <i>Switching Regulator</i>	55
4.4.2	Analisis sirkit kendali rekonfigurasi paralel-seri sel surya dan baterai.....	56
BAB 5 KESIMPULAN		59
DAFTAR REFERENSI		60
LAMPIRAN.....		61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi pembuatan silikon jenis p dan n	6
Gambar 2.2	Semikonduktor Jenis N dan Jenis P sebelum disambung....	7
Gambar 2.3	Semikonduktor Jenis N dan Jenis P sesudah tersambung....	7
Gambar 2.4	Daerah Depleksi (Depletion region) Pada Sambungan Semikonduktor	7
Gambar 2.5	Garis Medan Listrik E pada Sambungan Semikonduktor....	8
Gambar 2.6	Proses aliran arus listrik pada sambungan pn	9
Gambar.2.7	Penyerapan Cahaya Matahari Pada Sel surya.....	9
Gambar 2.8	<i>Electron-hole photogeneration</i> Pada Sambungan Semikonduktor	10
Gambar 2.9	Rangkaian ekuivalen sel surya.....	11
Gambar 2.10	Efek pergeseran kurva I-V pada sel surya akibat iluminasi cahaya.....	12
Gambar 2.11	Diagram Sirkuit untuk Kurva I-V.....	12
Gambar 2.12	Karakteristik Sel Surya Pada Penyinaran dan Gelap	13
Gambar 2.13	Kurva I-V Menunjukkan Arus Short Circuit.....	14
Gambar 2.14	Kurva I-V Menunjukkan Tegangan Open Circuit.....	14
Gambar 2.15	Titik Daya, Tegangan, dan Arus Maksimum pada Kurva I-V sel Surya Untuk Menunjukkan Fill Factor.....	15
Gambar 2.16	Bentuk sel, Modul/Panel dan Array dari sel surya.....	16
Gambar 2.17	Rangkaian Buck Converter.....	18
Gambar 2.18	Topologi <i>Buck Converter</i>	19
Gambar 2.19	Keadaan ON (ON State) Buck regulator.....	19
Gambar 2.20	Arus Induktor Buck Regulator	20
Gambar 2.21	Keadaan OFF Buck Regulator.....	21
Gambar 2.22	Kapasitor Paristik	22
Gambar 2.23	<i>Grounding</i> yang salah	25
Gambar 2.24	<i>Grounding</i> yang benar	26
Gambar 2.25	Penggunaan L-C filter di antara sumber daya dan <i>switching regulator</i>	27
Gambar 2.26	Proses pengosongan pengisian (<i>Discharge</i>) baterai	30
Gambar 2.27	Proses <i>charge</i> baterai	31
Gambar 2.28	Rangkaian Dasar Komparator	34
Gambar 2.29	Keluaran <i>non-inverting comparator</i>	34
Gambar 2.30	Pin Diagram LM324	35
Gambar 3.1	Blok Diagram Sistem.....	36
Gambar 3.2	Diagram Perancangan Sistem	37
Gambar 3.3	Bentuk IC L4970A Tampak Depan.....	39
Gambar 3.4	Diagram rangkaian dalam IC L4970A.....	40
Gambar 3.5	Rangkaian <i>switching regulator</i> dengan IC L4970A.....	41
Gambar 3.6	<i>Voltage Divider</i>	42
Gambar 3.7	Perancangan <i>Voltage Divider</i> Baterai.....	43
Gambar 3.8	Perancangan rangkaian komparator op-amp untuk charge/discharge baterai	43

Gambar 3.9	Perancangan <i>Voltage Divider</i> Tegangan Sel Surya	45
Gambar 3.10	Perancangan rangkaian komparator op-amp untuk Rekonfigurasi Seri-paralel Sel surya	45
Gambar 3.11	Rangkaian <i>Relay Driver</i>	46
Gambar 3.12	Perancangan Rangkaian <i>Relay Driver</i> <i>Charging/Discharging</i> Baterai	46
Gambar 3.13	Perancangan Rangkaian <i>Relay Driver</i> Rekonfigurasi Seri/Paralel Sel Surya	48
Gambar 3.14	Skematik Perancangan sistem	49
Gambar 4.1	Konfigurasi pengujian untuk mengukur (a) tegangan sel surya dan (b) arus sel surya	51
Gambar 4.2	Konfigurasi pengujian rangkaian <i>switching regulator</i>	52
Gambar 4.3	Konfigurasi pengujian sirkit kendali rekonfigurasi paralel-seri sel surya.....	53
Gambar 4.4	Konfigurasi pengujian sirkit kendali charge/discharge baterai	54
Gambar 4.5	Konfigurasi pengujian sistem.....	55
Gambar 4.6	Kurva <i>input</i> (sel surya) terhadap keluaran sistem	57

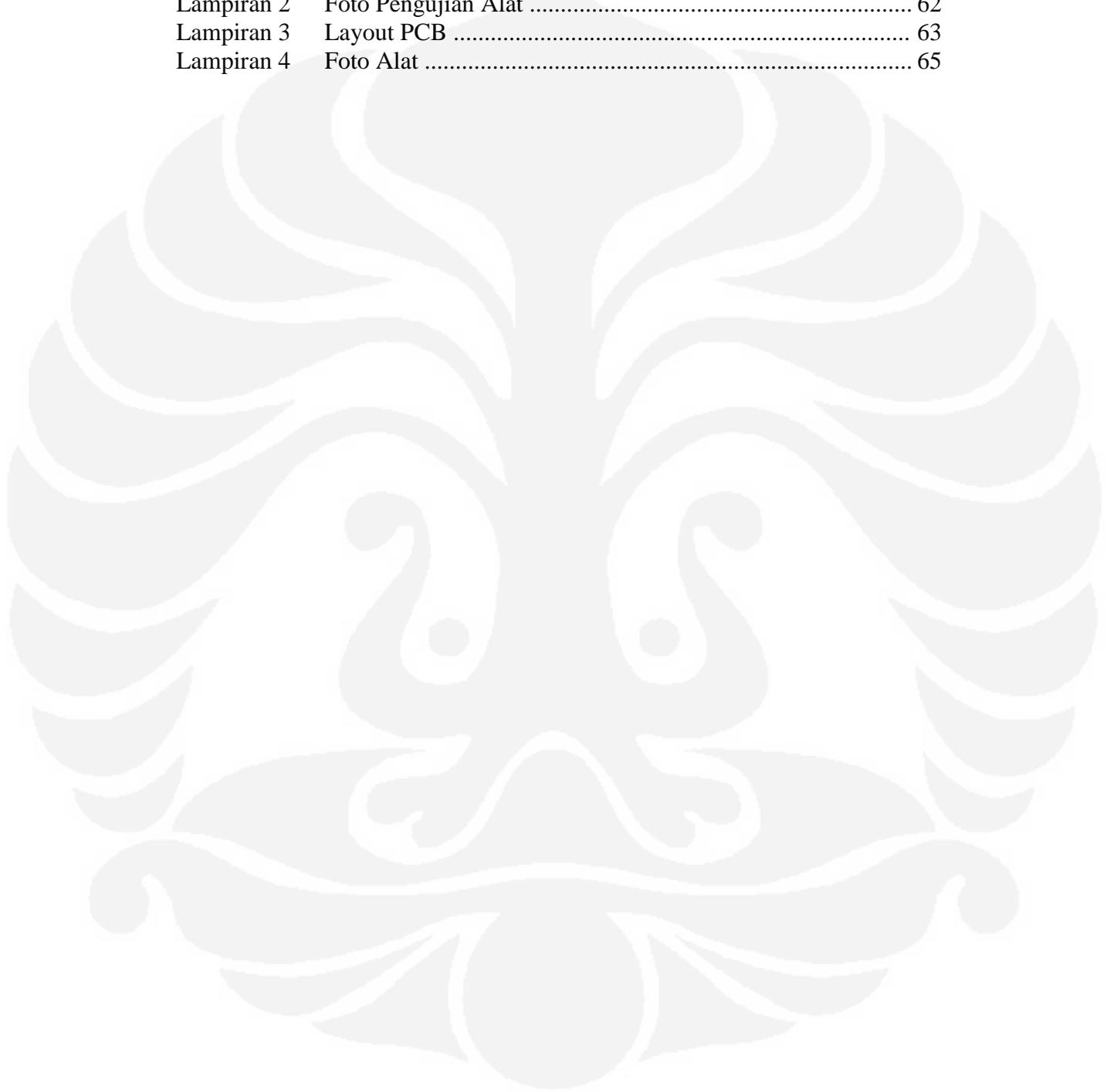
DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Karakteristik spesifikasi sel surya.....	38
Tabel 4.1	Data pengujian <i>switching regulator</i>	52
Tabel 4.2	Pengujian sirkit Rekonfigurasi Paralel/seri Sel surya.....	53



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Hasil Pengujian Pengujian Alat.....	61
Lampiran 2	Foto Pengujian Alat	62
Lampiran 3	Layout PCB	63
Lampiran 4	Foto Alat	65



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat vital dalam kehidupan umat manusia. Kebutuhan akan sumber energi listrik pun semakin lama akan semakin meningkat dan peningkatan ini harus diimbangi oleh penyediaan sumber energi listrik tersebut. Oleh sebab itu penyediaan energi listrik pun akan terus bertambah. Kesadaran bahwa selama ini, penyediaan energi listrik masih sangat tergantung pada sumber energi tak-terbarukan yang berasal dari sumber daya alam seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam yang notabene cepat atau lambat sumber energi tersebut akan habis. Dan hal ini akan menimbulkan krisis energi di masa yang akan datang, sehingga dibutuhkan suatu solusi untuk mengganti sumber energi yang lebih efisien.

Upaya-upaya pencarian sumber energi alternatif selain fosil menyemangati para peneliti di berbagai negara untuk mencari energi lain yang telah dikenal sekarang dengan istilah energi terbarukan. Energi terbarukan dapat didefinisikan sebagai energi yang secara cepat dapat diproduksi kembali melalui proses alam. Indonesia memiliki potensi sumberdaya energi yang sangat beragam mulai dari tenaga air, panas bumi, *mini/micro hydro*, biomasa, tenaga surya, tenaga angin sampai nuklir. Akan tetapi dari potensi sumber daya yang dimiliki tersebut di atas baru sebagian kecil yang benar-benar bisa dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif pengganti energi minyak bumi ^[1]. Beberapa kelebihan energi terbarukan antara lain: sumbernya relatif mudah didapat; dapat diperoleh dengan gratis, minim limbah, tidak mempengaruhi suhu bumi secara global, dan tidak dipengaruhi oleh kenaikan bahan bakar.

Untuk mengatasi permasalahan yang dikemukakan diatas, banyak solusi yang telah ditemukan. Salah satunya dengan menggunakan sumber energi matahari dengan teknologi Sel Surya (*Solar Cell*) sebagai alternatif

pengganti. Sel surya merupakan komponen pengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Pemanfaatan sinar matahari merupakan satu diantara sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Selain tersedia secara gratis pemanfaatan sinar matahari ini sebagai salah satu upaya untuk mengurangi ketergantungan manusia terhadap energi batubara, minyak bumi dan gas alam yang pada kenyataannya tidak dapat untuk diperbaharui.

Dari banyak kelebihan energi alternatif sel surya ini, masih ada kekurangan yang harus dapat diselesaikan, antara lain :

1. Energi yang dihasilkan tidak konstan, karena radiasi matahari sewaktu dapat berubah-ubah. Sehingga memerlukan suatu teknik kontrol untuk mencapai efisiensi penyerapan energi matahari yang optimal
2. Diperlukan alat penyimpan energi listrik.

Dari penelitian diatas, mendorong penulis untuk mencoba membuat suatu alat kontrol berbasis elektronik, agar supaya energi listrik yang diperoleh dari sumber energi matahari yang tidak konstan ini dapat dimanfaatkan dengan maksimal. Dengan alasan tersebut maka penulis mengambil judul :

“Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel”

1.2 TUJUAN SKRIPSI

Tujuan dari skripsi ini adalah merancang dan membangun sebuah perangkat elektronik pengendali pengisian arus sel surya dengan kemampuan otomatis merekonfigurasi susunan sel surya dari paralel ke seri atau sebaliknya.

1.3 BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini hanya akan dibahas perancangan dan bangun sistem elektronik pengendali pengisian arus sel surya. Sistem elektronik pengendali pengisian arus sel surya ini, didefinisikan sebagai 2 unit sel surya 50Wp, 1 unit sirkit pengendali arus dan 1 unit sirkit kendali rekonfigurasi sel surya

dari paralel ke seri atau sebaliknya, dan 1 baterai 12V/5Ah. Sistem ini disebut sebagai 1 unit sel energi terbarukan sel surya.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian performansi pengisian arus yang diharapkan tidak melebihi batasan karakterisasi sel surya yaitu 3,5A. Selain itu dilakukan pengujian performansi kendali rekonfigurasi sel surya dari paralel ke seri atau sebaliknya sehingga dapat terpenuhinya syarat tegangan pengisian baterai sebesar 13V.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap pembatasan pengisian arus ke baterai pada saat baterai sudah penuh, yang diindikasikan dengan tegangan baterai sebesar 12V.

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Pada laporan skripsi ini sistematika penulisannya dibagi dalam beberapa bab. Bab I merupakan pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab II berisi tentang pengenalan tentang teori sel surya, *switching regulator*, baterai dan komparator. Bab III menjelaskan perancangan sistem dan bagian-bagian yang akan diuji sesuai blok diagram perancangan sistem yang terdiri dari sel surya, *switching regulator*, *voltage divider*, komparator, dan *relay driver*. Bab IV berisi mengenai pengujian sistem dan analisis hasil pengujian. Bab V berisi kesimpulan dari dasar-dasar sistem, perancangan dan pengujian alat.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Sel Surya (Solar Cell)

Sel surya atau *Solar Cell* merupakan elemen aktif struktur dioda yang terbuat dari semikonduktor atau polimer dan berfungsi untuk mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Konversi energi ini dihasilkan dari irradiansi cahaya pada sel surya, dan hal ini diketahui sebagai efek *photovoltaic*. Ketika cahaya mengenai sel surya, energi foton yang lebih besar dari energi *band gap* akan mengeksitasi elektron valensi, sehingga pasangan *electron-hole* akan tergenerasi yang kemudian pasangan *electron-hole* ini akan menimbulkan medan listrik.

Pada umumnya sel surya terbuat dari bahan semikonduktor silikon, tetapi sekarang ini telah dikembangkan DSSC. DSSC merupakan sel surya fotoelektrokimia yang menggunakan menggunakan elektrolit sebagai medium transport muatan, berbahan dasar polimer tumbuhan yaitu antosianin, klorofil, dan xantofil [2]. Peneliti telah membuktikan bahwa klorofil dan xantofil dapat tereksitasi dengan adanya penyinaran pada penerapan dyes. Sebagai hasil pengembangannya, peneliti telah mendapatkan efisiensi konversi energi yang lebih baik pada turunan dyes klorofil [2].

Salah satu bahan sel surya berbasis semikonduktor adalah kristal silikon (c-Si). Bahan ini merupakan silikon murni (elektron valensi 4) yang diberi *dope acceptor* bervalensi 3 (boron) sehingga menjadi silikon tak murni (kekurangan sebuah elektron). Silikon jenis ini kemudian diberi nama silikon tipe-*p*. Sebuah silikon murni yang diberi *dope donor* bervalensi 5 (phospor) sehingga kelebihan sebuah elektron juga menghasilkan silikon tipe-*n*. Sambungan kedua jenis silikon ini akan membentuk persambungan (*junction*) *pn* dioda. Pada batas sambungan akan timbul medan listrik yang disebabkan oleh difusi elektron ke *p* dan difusi *hole* ke *n* yang memunculkan daerah disebut *depletion layer*.

Pada semikonduktor c-Si, energi-gapnya sebesar 1,11 eV, artinya bila elektron pada pita valensi Si memperoleh energi foton yang lebih besar dari 1,11 eV maka elektron akan tereksitasi mengatasi energi gap dan berpindah menuju pita konduksi dikedua bagian dioda baik *p* maupun *n*. Energi yang tersimpan di *conduction band* dapat dimanfaatkan dengan menggunakan resistor beban, yang pada akhir energi tersebut tersalurkan dan elektron akhirnya menurun energinya dan kembali ke *valence band* ^[3].

$$E = h\nu > E_g \quad (2.1)$$

Dengan *h* dan ν masing-masing adalah konstanta Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ Js) dan frekuensi cahaya yang jatuh pada permukaan sel surya. Frekuensi ini dapat dinyatakan sebagai hubungan :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

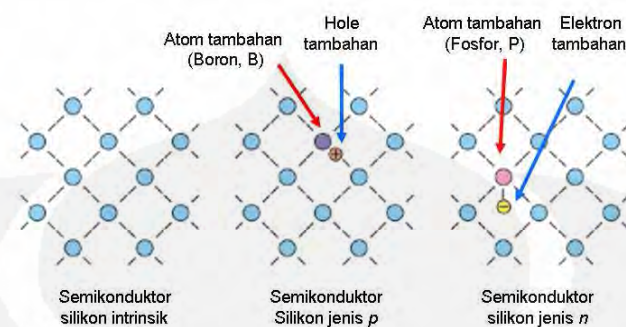
Untuk *c* dan λ masing-masing menyatakan laju dan panjang-gelombang cahaya. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm dan menghasilkan tegangan 0,5 sampai 0,6 Volt.

2.1.1. Cara Kerja Sel Surya

Struktur sel surya yaitu berupa dioda sambungan (*junction*) antara dua lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor yang masing-masing diketahui sebagai semikonduktor jenis *p* (positif) dan semikonduktor jenis *n* (negatif). Semikonduktor jenis *n* merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif. Sedangkan semikonduktor jenis *p* memiliki kelebihan *hole*, sehingga kelebihan muatan positif.

Proses pengubahan atau konversi cahaya matahari menjadi listrik ini karena divais sel surya memiliki struktur dioda, yaitu tersusun atas dua jenis semikonduktor, yakni jenis *n* dan jenis *p*. Caranya dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka kita dapat

mengontrol jenis semikonduktor tersebut, seperti diilustrasikan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Ilustrasi pembuatan silikon jenis *p* dan *n* ^[4]

Di dalam semikonduktor alami (semikonduktor intrinsik) ini, elektron maupun hole memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau *hole* dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor.

Semikonduktor intrinsik yang dimaksud ialah silikon (Si). Semikonduktor jenis *p*, biasanya dibuat dengan menambahkan unsur boron (B), aluminium (Al), gallium (Ga) atau Indium (In) ke dalam Si. Unsur-unsur tambahan ini akan menambah jumlah *hole*, sedangkan semikonduktor jenis *n* dibuat dengan menambahkan nitrogen (N), fosfor (P) atau arsen (As) ke dalam Si. Dari sini, tambahan elektron dapat diperoleh, sedangkan Si intrinsik sendiri tidak mengandung unsur tambahan. Usaha menambahkan unsur tambahan ini disebut dengan *doping* yang jumlahnya tidak lebih dari 10^{-7} dibandingkan dengan berat Si yang akan di-*doping*.

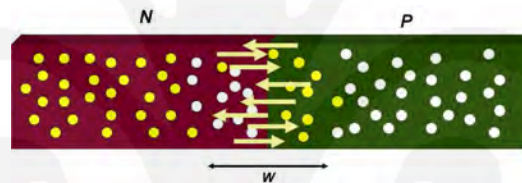
Dua jenis semikonduktor *n* dan *p* ini jika disatukan akan membentuk sambungan *pn* atau dioda *p-n* (istilah lain menyebutnya dengan sambungan metalurgi/*metallurgical junction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung,



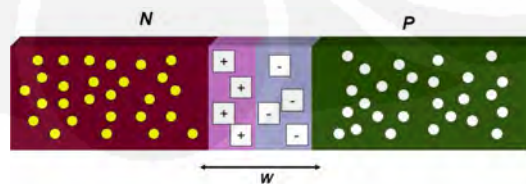
Gambar 2.2 Semikonduktor Jenis N dan Jenis P Sebelum Disambung ^[4]

2. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron-elektron dari semikonduktor n menuju semikonduktor p , dan perpindahan $hole$ dari semikonduktor p menuju semikonduktor n , proses ini disebut difusi. Perpindahan elektron maupun hole ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal, karena gaya tarik elektrostatis yang ditinggalkan.



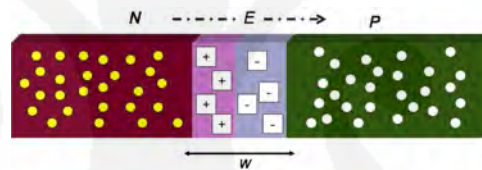
Gambar 2.3 Semikonduktor Jenis N dan Jenis P sesudah Tersambung ^[4]

3. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan $hole$ pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah hole pada semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan negatif. Pada saat yang sama, $hole$ dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.



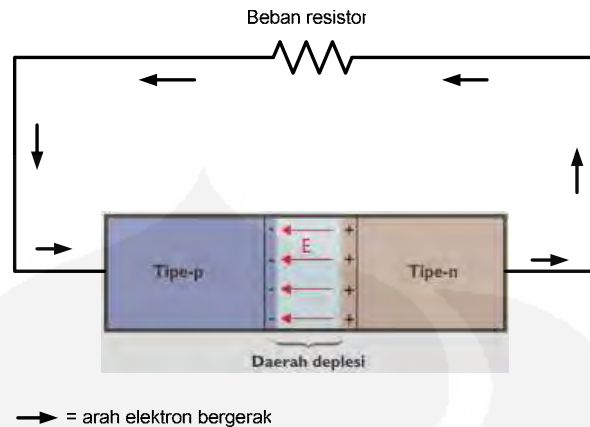
Gambar 2.4 Daerah Deplesi (Depletion region) Pada Sambungan Semikonduktor ^[4]

4. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) dengan jarak huruf W .
5. Elektron yang difusi ke p akan mengisi *holes* yang ada di daerah *junction layer p* sehingga daerah tersebut menjadi intrinsik. Begitu pula *holes* yang difusi ke n akan menarik elektron di daerah *junction layer n*, sehingga daerah tersebut menjadi daerah intrinsik di bagian *junction n* dan p , dan daerah *junction* ini disebut *depletion layer*.
6. Dikarenakan adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul dengan sendirinya medan listrik internal E dari sisi positif ke sisi negatif, yang mencoba menarik kembali *hole* ke semikonduktor p dan elektron ke semikonduktor n . Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan *hole* maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi (nomor 1 di atas). Gambar 2.5 menunjukkan garis medan listrik (E) pada sambungan semikonduktor.



Gambar 2.5 Garis Medan Listrik E pada Sambungan Semikonduktor ^[4]

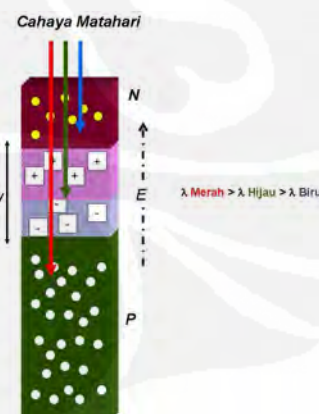
7. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan pn berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah *hole* yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah *hole* yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p akibat medan listrik E . Begitu pula dengan jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor n ke p , dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor n akibat tarikan medan listrik E . Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan *hole* berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Pada sambungan dioda pn inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Gambar 2.6 menunjukkan proses aliran arus listrik pada sambungan pn .



Gambar 2.6. proses aliran arus listrik pada sambungan pn

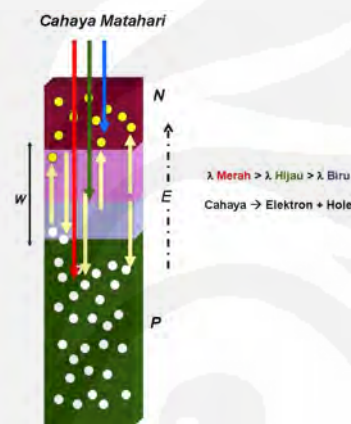
Elektron eksitasi yang dihasilkan oleh bagian p akan tertarik menuju ke bagian n karena medan listrik yang ada di depletion layer. Hal ini menyebabkan tegangan bagian n menjadi lebih negatif dan bagian p menjadi lebih positif. Perbedaan potensial antara p dan n ini dapat dimanfaatkan energinya dengan menyalurkan melalui beban resistor beban.

Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p , sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p . Gambar 2.7 menunjukkan garis penyerapan cahaya matahari pada sel surya.



Gambar 2.7 Penyerapan Cahaya Matahari Pada Sel surya ^[4]

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n , daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi elektron-hole (*electron-hole photogeneration*) yakni, terbentuknya pasangan elektron dan *hole* akibat cahaya matahari. Gambar 2.8 menunjukkan proses *electron-hole photogeneration* pada sambungan semikonduktor.



Gambar 2.8 *Electron-hole photogeneration* Pada Sambungan Semikonduktor ^[4]

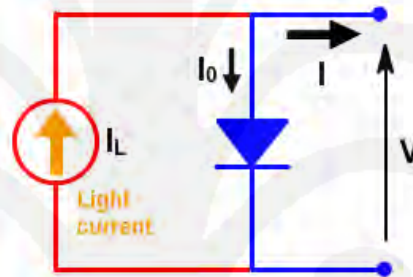
Cahaya matahari dengan panjang gelombang (dilambangkan dengan simbol λ “lambda”) yang berbeda, membuat fotogenerasi pada sambungan pn berada pada bagian sambungan pn yang berbeda pula. Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n . Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan pn terdapat medan listrik E , elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n , begitu pula dengan *hole* yang tertarik ke arah semikonduktor p .

2.1.2. Parameter Sel Surya

Sel surya memiliki beberapa parameter yang dapat diuraikan berikut ini :

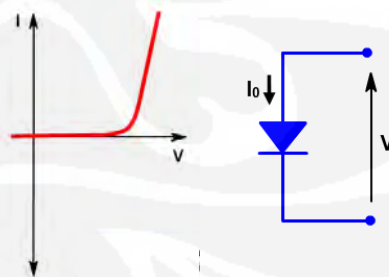
2.1.2.1. Kurva Karakteristik Sel Surya

Kurva I-V merupakan kurva karakteristik arus-tegangan yang menggambarkan unjuk kerja suatu divais sel surya. Kurva I-V sel surya merupakan superposisi kurva I-V dioda dari sel surya pada keadaan gelap dengan arus yang dibangkitkan oleh cahaya (*light generated current*). Cahaya memberikan efek pada pergeseran kurva I-V sel surya yang berarti sel surya telah menghasilkan daya ^[5]. Gambar 2.9 menunjukkan rangkaian ekuivalen sel surya.

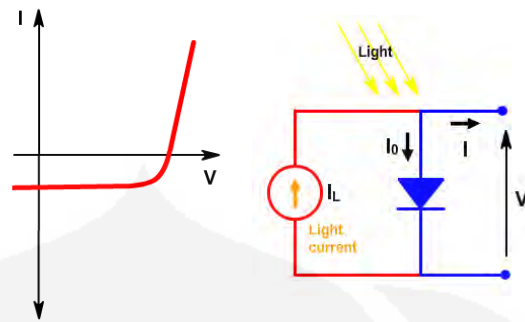


Gambar 2.9. Rangkaian ekuivalen sel surya ^[5]

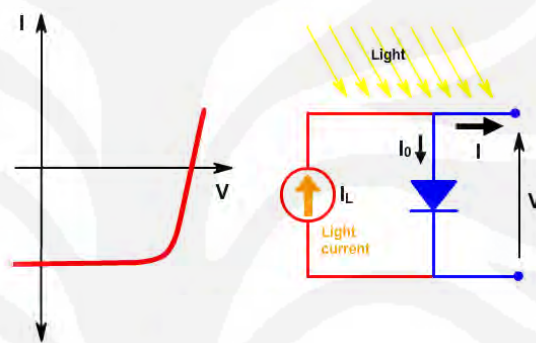
Gambar 2.10 (a), (b), (c) merupakan gambar efek pergeseran kurva I-V pada sel surya akibat adanya iluminasi cahaya yang diterima sel surya :



(a). Tanpa iluminasi cahaya, sel surya memiliki karakteristik kelistrikan yang sama dengan sebuah dioda ^[5]



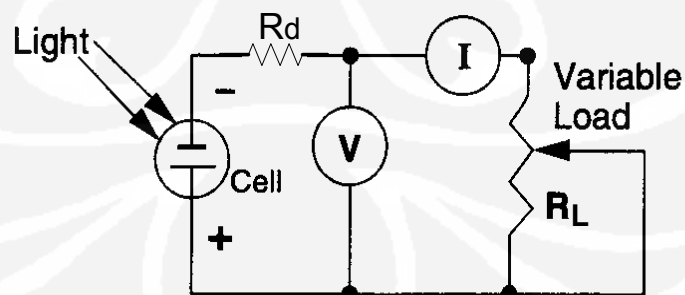
(b). ketika cahaya mengenai sel surya, kurva I-V mengalami pergeseran, menunjukkan sel surya mulai menghasilkan daya (energi listrik) ^[5]



(c). Semakin besar iluminasi cahaya yang diterima, semakin besar pula pergeseran kurva I (arus) ^[5]

Gambar 2.10 (a, b, c) Efek pergeseran kurva I-V pada sel surya akibat iluminasi cahaya.

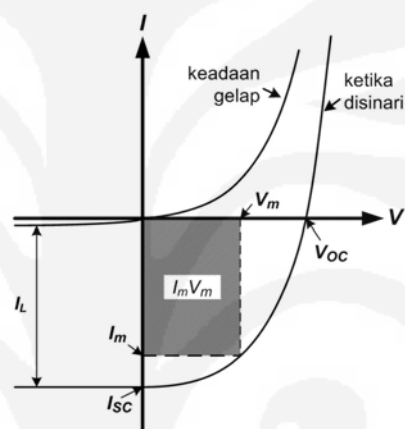
Gambar 2.11 memperlihatkan rangkaian untuk memperoleh karakteristik kurva I-V sel surya.



Gambar 2.11 Diagram Sirkuit untuk Kurva I-V ^[6]

Dengan mengatur hambatan dari nol sampai ke besar akan didapatkan kurva karakteristik arus dan tegangan sel surya. Bila

hambatan diatur sama dengan nol, maka didapat arus hubung singkat (*short circuit current*) atau I_{sc} sebagai fungsi *irradiance* sel surya. Bila hambatannya sangat besar, maka tidak ada arus yang melewatinya, kondisi ini sama dengan memutus penghubung pada ampere meter, dan hasil penunjukkan pada pengukur voltmeter merupakan tegangan tanpa beban (*open-circuit voltage*) atau V_{oc} . Gambar 2.12 memperlihatkan kurva karakteristik sel surya pada saat penyinaran dan keadaan gelap.



Gambar 2.12 Karakteristik Sel Surya Pada Penyinaran dan Gelap^[6]

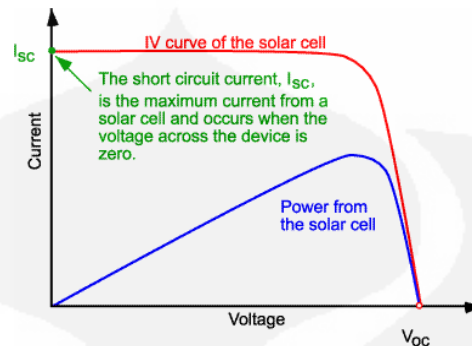
Dari Gambar 2.12 menunjukkan karakteristik sel surya yang disinari terdapat tiga titik, yaitu tegangan tanpa beban (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}) dan titik daya maksimum yang merupakan perkalian antara arus (I_m) dan tegangan (V_m). Arus dan tegangan maksimum terjadi pada saat sel surya menghasilkan daya maksimum. Selain itu menunjukkan bahwa pemberian iluminasi akan menambah nilai arus keadaan gelap normal.

2.1.2.2. Arus *Short Circuit* (I_{sc}) dan Tegangan Open Circuit (V_{oc})

Arus *Short Circuit* (I_{sc})

Arus *Short Circuit* atau arus hubung singkat (I_{sc}) merupakan arus yang melalui sel surya saat tegangan yang melalui sel surya bernilai nol atau ketika beban dihubungkan singkat. Arus ini disebabkan

oleh proses *generation* dan pengumpulan dari *carrier* yang dihasilkan dari iluminasi cahaya matahari. Kurva I-V yang menunjukkan arus *short circuit* diperlihatkan pada Gambar 2.13 :



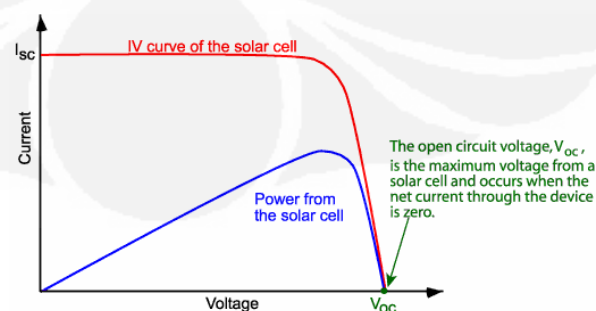
Gambar 2.13 Kurva I-V Menunjukkan Arus Short Circuit ^[5]

Arus *short circuit* berbanding lurus terhadap intensitas cahaya matahari yang menyinari permukaan divais. Arus *short circuit* ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

1. Jumlah Foton
2. Luas area sel surya
3. Spektrum cahaya yang diterima
4. karakteristik optik
5. Probabilitas pengumpulan iluminasi

Tegangan *Open Circuit* (V_{oc})

Tegangan *open circuit* atau tegangan pada saat rangkaian terbuka merupakan tegangan maksimum yang dihasilkan divais sel surya yang terjadi pada saat arus sebesar nol Ampere. Kurva I-V yang menunjukkan tegangan *open circuit* dijelaskan pada Gambar 2.14 :

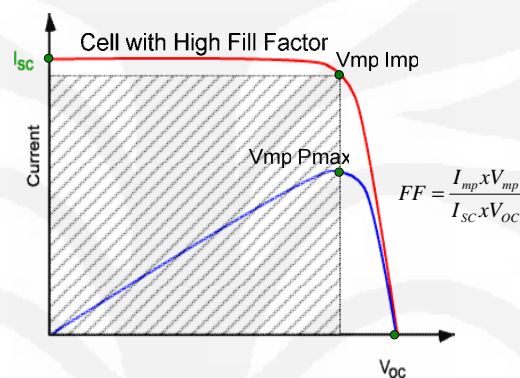


Gambar 2.14 Kurva I-V Menunjukkan Tegangan Open Circuit ^[5]

Berdasarkan grafik diatas, Voc meningkat secara logaritmis terhadap kenaikan intensitas cahaya matahari.

2.1.2.3. Fill Factor

Fill Factor (FF) merupakan parameter yang berfungsi untuk menentukan daya maksimum dari sel surya dalam kaitannya dengan Voc dan Isc. Gambar 2.15 menunjukkan *fill factor* pada kurva yang memperlihatkan titik daya, tegangan dan arus maksimum.



Gambar 2.15 Titik Daya, Tegangan, dan Arus Maksimum pada Kurva I-V sel Surya Untuk Menunjukkan Fill Factor ^[5]

FF akan menentukan besarnya daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh suatu divais, sehingga akan menentukan besarnya arus dan tegangan maksimum *power point*. Pada Gambar 2.15 terlihat bahwa daerah yang dibentuk oleh $V_m I_m$ lebih kecil daripada daerah yang dibentuk oleh $V_{oc} I_{sc}$. Perbandingan inilah yang disebut dengan *fill factor*. *Fill factor* dikatakan baik apabila memiliki nilai mendekati 1.

2.1.2.4. Karakteristik Efisiensi Energi

Efisiensi konversi adalah perbandingan antara daya yang dapat diperoleh sebuah sel surya dengan daya yang diterima dari cahaya matahari.

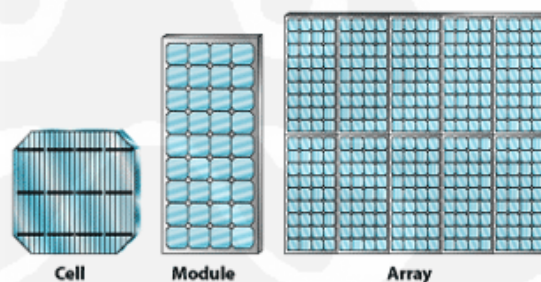
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (2.3)$$

2.1.3. Rangkaian Seri dan Pararel Sel Surya

Bila sel surya dihubungkan seri maka tegangan yang dibangkitkan akan semakin besar tetapi arus yang dibangkitkan tetap, sedangkan jika dihubungkan paralel maka arus yang dibangkitkan akan semakin besar tetapi tegangan yang dibangkitkan tetap^[6], dan untuk mendapatkan arus dan tegangan yang besar kita bisa menyusun sel surya tersebut seri atau paralel tergantung kegunaannya.

2.1.3.1. Konfigurasi Sel surya

Agar dapat memperoleh sejumlah tegangan atau arus yang memadai, maka umumnya masing-masing sel surya dikonfiurasikan satu dengan lainnya baik secara hubungan seri ataupun secara paralel untuk membentuk suatu rangkaian sel surya yang disebut “Modul sel surya”. Sebuah modul sel surya umumnya terdiri dari 36 sel surya atau 33 sel, dan 72 sel. Beberapa modul sel surya dihubungkan seri atau paralel untuk membentuk satu rangkaian yang disebut “Panel sel surya” , sedangkan jika modul sel surya dihubungkan secara baris dan kolom disebut “Array sel surya” lihat gambar 2.16.



Gambar 2.16 Bentuk sel, Modul/Panel dan Array dari sel surya^[4]

2.2. Switching Regulator

Switching regulator memiliki keunggulan berupa efisiensi konversi daya yang lebih tinggi dan meningkatkan fleksibilitas desain (tegangan keluaran jamak dari polaritas yang berbeda-beda dapat dihasilkan dari sebuah tegangan masukan tunggal).

Prinsip-prinsip operasi dari empat jenis *converter switching* yang sering digunakan :

1. *Buck*; digunakan untuk mengurangi tegangan DC menjadi tegangan DC yang lebih rendah.
2. *Boost*; memberikan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari pada masukannya.
3. *Buck-Boost (Invert)*; tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki polartas yang berlawanan dengan masukannya.
4. *Flyback*; tegangan keluaran yang lebih rendah atau lebih tinggi daripada masukan dapat dihasilkan sama baiknya dengan keluaran jamak.

Beberapa topologi *converter multi-transistor*:

1. *Push-Pull*; suatu *converter* dua transistor yang sangat efisien pada tegangan masukan rendah.
2. *Half-Bridge*: suatu *converter* dua transistor yang banyak digunakan pada aplikasi-aplikasi *off-line*.
3. *Full-Bridge*: suatu *converter* empat-transistor (biasanya digunakan pada rancangan *offline*) yang dapat menghasilkan daya kaluaran yang paling tinggi disbanding semua tipe yang terdaftar ^[7].

2.2.1. Hukum Induktansi

Apabila tegangan melalui sebuah induktor, maka arus akan mengalir melalui induktor tersebut (dan arus tersebut bervariasi sesuai waktu). Perlu diperhatikan bahwa arus yang mengalir dalam suatu induktor akan bervariasi sesuai waktu walaupun tegangan yang masuk konstan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa apabila arus yang bervariasi terhadap waktu dialirkan kedalam suatu induktor, maka akan terjadi tegangan disepanjang induktor.

Hukum dasar yang menjelaskan hubungan antara tegangan dan arus dalam sebuah induktor adalah rumus berikut ^[7]:

$$V = L (di/dt) \quad (2.4)$$

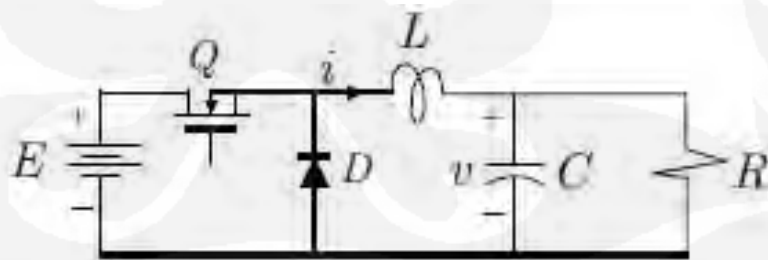
Pada hukum induktansi terdapat dua karakteristik induktor^[7]:

1. Tegangan disepanjang induktor dihasilkan hanya dari suatu arus yang berubah terhadap waktu. Arus DC yang stabil dalam inductor tidak menghasilkan tegangan disebaliknya (kecuali untuk tegangan jatuh yang kecil disebentang inti yang digunakan dililitan).
2. Arus yang mengalir dalam sebuah induktor tidak dapat berubah dengan drastis (dalam waktu nol detik), karena akan membutuhkan tegangan sebesar tak hingga untuk membuat kondisi tersebut terjadi.

2.2.2. Buck Regulator

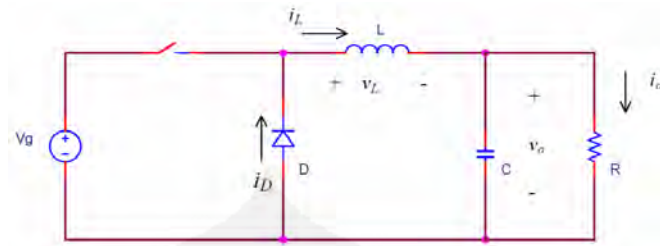
Switching Converter yang paling sering digunakan adalah *buck regulator*, yang digunakan untuk mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan DC dengan nilai potensial yang lebih rendah dan polaritas yang sama. Ini sangat penting dalam sistem yang menggunakan rentang tegangan (seperti 24 sampai 48 volt), yang akan dikonversi menjadi nilai tegangan tertentu seperti 5V, 12V atau 15V.

Buck converter menggunakan sebuah transistor yang digunakan sebagai saklar yang akan berfungsi untuk mengalirkan dan memutuskan tegangan masukan ke sebuah induktor.



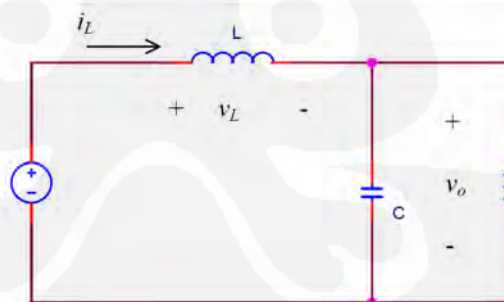
Gambar 2.17 Rangkaian Buck Converter^[8]

Buck converter adalah salah satu topologi DC-DC konverter yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC. Prinsip kerja rangkaian ini adalah dengan kendali pensaklaran. Komponen utama pada topologi *buck* adalah penyaklar, dioda *freewheel*, induktor, dan kapasitor.

Gambar 2.18 Topologi *Buck Converter*^[9]

Penyaklar dapat berupa transistor, mosfet, atau IGBT. Kondisi saklar terbuka dan tertutup ditentukan oleh isyarat PWM. Pada saat saklar terhubung, maka induktor, kapasitor, dan beban akan terhubung dengan sumber tegangan. Kondisi semacam ini disebut dengan keadaan ON (*ON state*). Saat kondisi ON maka dioda akan *reverse bias*. Sedangkan saat saklar terbuka maka seluruh komponen tadi akan terisolasi dari sumber tegangan. Keadaan ini disebut dengan kondisi OFF (*OFF state*). Saat kondisi OFF ini dioda menyediakan jalur untuk arus induktor. *Buck converter* disebut juga *down converter* karena nilai tegangan keluaran selalu lebih kecil dari inputnya.

Berikut ini adalah penjelasan mengenai kedua kondisi pada *buck converter*.

Gambar 2.19 Keadaan ON (ON State) *Buck regulator*^[7]

Pada saat kondisi ON maka rangkaian *buck converter* akan nampak seperti gambar 2.19 dioda akan *reverse bias*. Dengan demikian maka tegangan pada induktor adalah:

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.5)$$

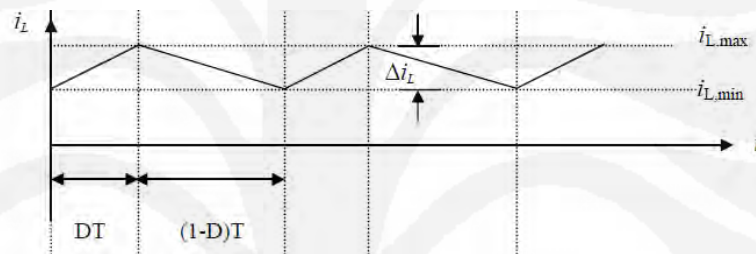
Sehingga diperoleh,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(V_s - V_o)}{L} \quad (2.6)$$

selama nilai turunan dari arus adalah konstanta positif, maka arus akan bertambah secara linear seperti yang digambarkan pada gambar 2.20 selama selang waktu 0 sampai dengan DT. Perubahan pada arus selama kondisi ON dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{(V_s - V_o)}{L} \quad (2.7)$$

$$\Delta i_L \text{ closed} = \frac{(V_s - V_o)}{L} DT \quad (2.8)$$



Gambar 2.20 Arus Induktor *Buck Regulator*^[9]

Pada saat kondisi OFF atau saklar terbuka, maka dioda menjadi *forward bias* untuk menghantarkan arus induktor, dan rangkaian *buck converter* akan nampak seperti gambar 2.21 Tegangan pada induktor saat saklar terbuka adalah

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.9)$$

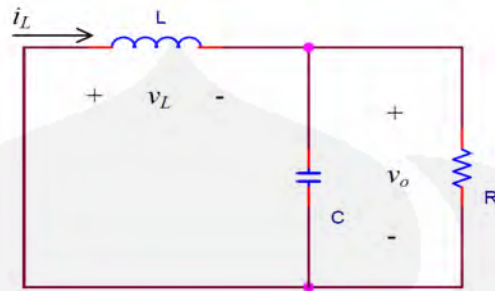
sehingga diperoleh

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \quad (2.10)$$

Turunan dari arus di induktor adalah konstanta negatif, dan arus berkurang secara linear, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.20 pada ruas $(1-D)T$. perubahan pada arus induktor ketika saklar terbuka adalah

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L} \quad (2.11)$$

$$\Delta i_L \text{ open} = -\frac{V_o}{L}(1-D)T \quad (2.12)$$



Gambar 2.21 Keadaan OFF *Buck Regulator*^[8]

Operasi keadaan tunak (*steady state*) terpenuhi jika arus pada induktor pada akhir siklus penyaklaran adalah sama dengan saat awal penyaklaran, artinya perubahan pada arus induktor selama satu periode adalah nol. Hal ini berarti :

$$(\Delta i_L)_{\text{closed}} + (\Delta i_L)_{\text{open}} = 0$$

Berdasarkan persamaan $(\Delta i_L)_{\text{closed}}$ dan $(\Delta i_L)_{\text{open}}$ diperoleh

$$\frac{V_s - V_o}{L} DT - \frac{V_o}{L}(1-D)T = 0 \quad (2.13)$$

dengan menyelesaikan V_o diperoleh hubungan

$$V_o = V_s \cdot D \quad (2.14)$$

yang sama dengan apabila kita menghitung nilai dari integral keluaran selama 1 periode

$$\frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_{DT}^T v_s(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^{DT} 0 dt \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{T} \int_{DT}^T v_s(t) dt = \frac{1}{T} V_s(T - DT) = V_s \cdot D \quad (2.16)$$

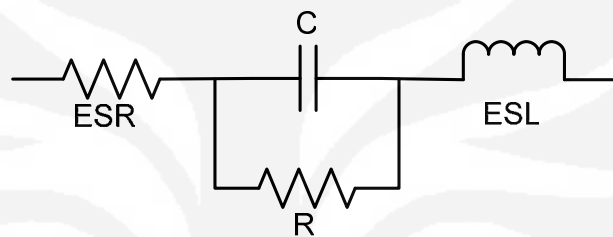
$$0 \leq D \leq 1$$

Berdasarkan pada persamaan 2.14 dan 2.16 Karena nilai tegangan keluaran *buck converter* sebanding dengan nilai *duty cycle*, maka untuk

memperoleh nilai keluaran tegangan yang bervariasi, caranya adalah dengan mengubah nilai *duty cyclenya*.

2.2.3. Metode Perancangan *Switching Regulator*

Kapasitor *parasitic* mempengaruhi kinerja *switching regulator*. Semua kapasitor mengandung unsur-unsur paristik yang membuat kinerja mereka kurang ideal, dimana posisi kapasitor terlihat seperti gambar 2.22 dibawah.



Gambar 2.22 Kapasitor Paristik^[9]

ESR : ESR (*Equivalent Series Resistances*) menyebabkan pemanasan internal karena akibat adanya daya dissipasi dalam bentuk *ripple* yang mengalir kedalam dan keluar kapasitor. Kapasitor dapat gagal apabila arus *ripple* melebihi batas maksimum.

ESR yang tinggi akan mengakibatkan tegangan keluaran *ripple* yang berlebihan, dan ketidakstabilan putaran regulator juga memungkinkan. ESR sangat bergantung pada suhu, meningkat dengan cepat pada temperatur dibawah sekitar 10°C.

ESL : ESL (*Effective Series Inductance*) membatasi efektivitas frekuensi tinggi dari kapasitor. ESL yang tinggi merupakan penyebab *electrolytic capacitors* perlu di-*bypassed* oleh film atau kapasitor keramik untuk memberikan kinerja frekuensi tinggi yang baik.

ESR, ESL, dan C pada kapasitor membentuk sebuah rangkaian resonansi, yang frekuensi resonansinya harus setinggi mungkin. *Switching regulator* menghasilkan tegangan *ripple* pada keluarannya dengan komponen berfrekuensi tinggi (>10Mhz), yang dapat menimbulkan bunyi pada

tegangan keluaran apabila frekuensi resonansi kapasitor rendah untuk berada didekat frekuensi ini.

Kapasitor Masukan

Semua *switching converters* yang digunakan pada umumnya beroperasi sebagai DC-DC *converters* yang “memotong” tegangan masukan DC pada frekuensi yang sangat tinggi. Sebagai *converter switches*, harus mengambil pulsa-pulsa arus dari sumber masukan. Impedansi sumber sangat penting, bahkan induksi dalam jumlah kecil dapat menghasilkan bunyi yang signifikan dan lonjakan tajam sesaat tegangan pada masukan dari *converter*.

Perancangan yang terbaik adalah dengan selalu menyediakan kapasitor *bypass* yang memadai sedekat mungkin pada masukan *switching converter*. Untuk hasil yang terbaik, sebuah *electrolytic* digunakan dengan *film capacitor* (dan mungkin kapasitor keramik) secara paralel untuk frekuensi tinggi *bypassing* yang optimal.

Efek ESR kapasitor keluaran

Fungsi utama pada kapasitor keluaran dalam *switching regulator* adalah penyaringan. Sama halnya dengan pengoprasian *converter*, harus mengalir masuk dan keluar kapasitor penyaring. ESR dari hasil keluaran kapasitor secara langsung akan mempengaruhi kinerja pada *switching regulator*. ESR ditetapkan pada frekuensi yang ditentukan.

Pada umumnya *electrolytic* hanya menentukan ESR pada 120 Hz, tetapi kapasitor untuk aplikasi *switching* berfrekuensi tinggi akan memiliki ESR yang dijamin berfrekuensi tinggi (sekitar 20 kHz sampai 100 kHz) beberapa parameter yang bergantung ESR :

- **Tegangan Ripple;**

Dalam banyak kasus, mayoritas hasil keluaran tegangan *ripple* dihasilkan dari ESR pada kapasitor keluaran. Jika ESR meningkat (karena akan beroperasi pada temperatur rendah) tegangan keluaran akan meningkat secara teratur.

- **Efisiensi;**

Selama arus *switching* mengalir kedalam dan keluar kapasitor (melewati ESR), kekuatannya menghilang kedalam . 'Terbuangnya' ini mengurangi daya keseluruhan efisiensi regulator, dan juga dapat menyebabkan kapasitor gagal apabila *ripple*-nya melebihi jumlah maksimum yang dizinkan untuk spesifikasi kapasitor.

- **Stabilitas Loop;**

Mempertahankan ESR dalam rentang "Stabil" tidak selalu mudah dalam desain yang harus beroperasi selama dalam rentang dalam rentang temperatur yang luas. ESR yang khusus dari aluminium *electrolytic* dapat meningkat 40 kali selama suhu turun dari 25°C sampai -40°C. ESR dari kapasitor keluaran dapat mempengaruhi kestabilan loop regulator. Komponen seperti LM2575 dan 2577 adalah kompensasi bagi stabilitas yang menganggap ESR dari keluaran kapasitor akan tetap dalam kisaran tertentu.

Dalam kasus ini, aluminium *electrolytic* harus diparalel dengan kapasitor jenis lain dengan ESR yang melengkung (seperti Film atau Tantalum) sehingga efektif ESR (yang merupakan nilai paralel dari dua ERS's) tetap berada dalam rentang yang diizinkan. (catatan: jika operasi dibawah -40°C diperlukan, aluminium *electrolytics* tidak layak untuk digunakan).

Kapasitor Bypass

Kapasitor *Bypass* berfrekuensi tinggi selalu direkomendasikan pada pin catu daya dari komponen IC, tetapi bila komponen yang digunakan dalam perancangan dekat dengan *switching converter*, maka kapasitor *bypass* mutlak diperlukan. Untuk memastikan pengoperasian rangkaian dengan benar semua pin catu daya IC harus di-*bypass* ke ground yang berinduksi rendah (untuk rincian tentang pelarangan, lihat bagian berikutnya).

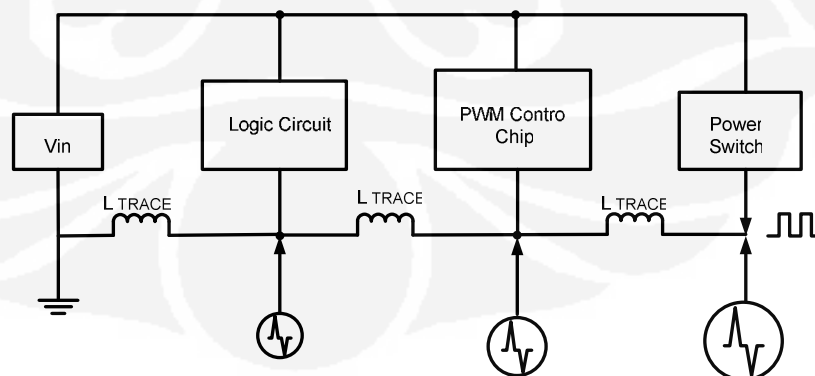
Proper Grounding

”Ground” pada rangkaian seharusnya berada pada satu potensial, namun pada kenyataannya tidak. Ketika arus *ground* mengalir dalam sebuah jalur rangkaian yang mana tidak memiliki nol resistansi, perbedaan tegangan akan menghasilkan potensial yang berbeda di sepanjang jalur *ground*.

Dalam DC atau rangkaian berfrekuensi rendah pengaturan *ground* relatif sederhana; satu-satunya parameter yang penting adalah hambatan DC dari sebuah induktor, karena hal tersebut menjelaskan jatuhnya tegangan untuk dapat menimbulkan arus. Pada rangkaian frekuensi tinggi, induktansi pada jalur rangkaian atau konduktorlah yang lebih penting.

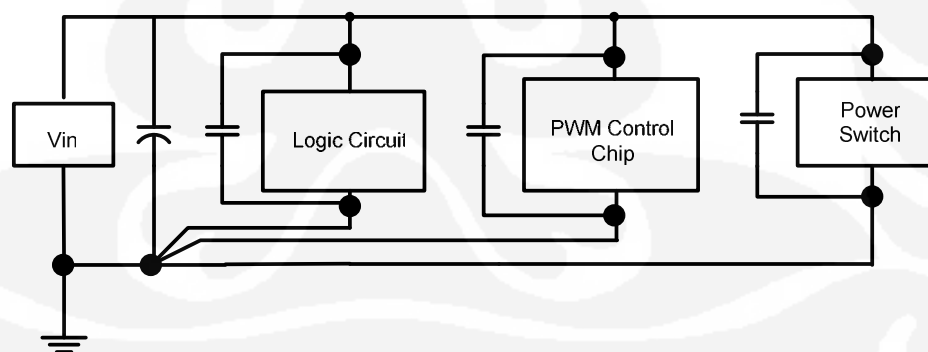
Dalam *switching converters*, puncak arus pulsa berfrekuensi tinggi (>50 kHz), yang dapat menyebabkan masalah jika jalur rangkaian memiliki induktivitas yang tinggi. Kebanyakan dari ”bunyi” dan ”lonjakan” yang terlihat pada bentuk gelombang tegangan dalam *switching converters* merupakan hasil dari arus tinggi yang disaklarkan melalui jalur parasitik (kabel) induktansi.

Arus pensaklaran pada frekuensi tinggi cenderung mengalir dekat permukaan konduktor (disebut ”skin effect”), yang berarti jalur *ground* harus sangat lebar dalam sebuah rangkaian untuk bisa mengatasi masalah. Biasanya terbaik (bila mungkin) untuk menggunakan satu sisi pada papan rangkaian sebagai *ground plane*.



Gambar 2.23 Grounding yang Salah^[7]

Gambar 2.23 menunjukkan ada pengembalian *power switch* tinggi saat melewati jalur yang juga menyediakan pengembalian terhadap IC PWM dan rangkaian logika. Pulsa *Switching current* mengalir melalui jalur yang akan menyebabkan lonjakan tegangan (positif dan negatif) terjadi sebagai akibat dari meningkat dan menurunnya aliran saklar. Lonjakan tegangan berikut ini sesuai dengan persamaan $V=L(di/dt)$ yaitu hukum induktifitas. Penting untuk dicatat bahwa besarnya lonjakan akan berbeda di semua titik sepanjang jalur, yang terbesar didekat saklar listrik. Mengambil simbol *ground* sebagai titik acuan, ini menunjukkan bagaimana ketiga rangkaian akan terpental ke atas dan ke bawah. Kesalahan operasi sering terjadi saat bagian sensitif dari rangkaian “berkelontang” ke atas dan ke bawah karena arus *ground* pada *switching*. Hal ini dapat menimbulkan kebisingan pada referensi yang digunakan untuk mengatur tegangan keluaran, sehingga menghasilkan output *ripple* yang berlebihan. Sangat sering, regulator yang bermasalah dengan kebisingan tersebut menjadi tak stabil dan menyebabkan osilasi karena arus beban ditingkatkan (yang meningkatkan arus *ground*). *Layout* yang lebih baik ditunjukkan pada Gambar 2.24.



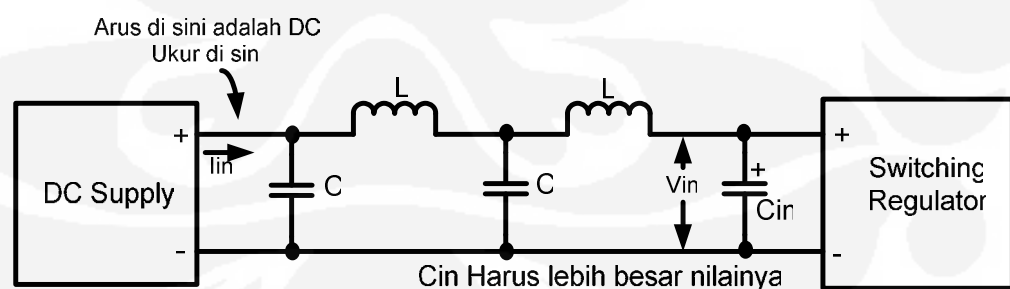
Gambar 2.24 Grounding yang Benar^[7]

Penyempurnaan yang lebih baik telah dibuat dengan menggunakan *single-point grounding*. Kapasitor elektrolit yang baik (seperti solid tantalum) digunakan dekat dengan sumber tegangan masukan untuk menghasilkan *ground point* yang baik. Masing-masing elemen rangkaian dikembalikan ke titik ini menggunakan jalur *ground*

yang terpisah. Hal ini mencegah pulsa arus *ground* dari terpentalnya rangkaian logika ke atas dan ke bawah. Penyempurnaan penting lainnya peningkatan daya saklar (yang memiliki arus pin *ground* tertinggi) terletak sedekat mungkin ke kapasitor masukan. Ini meminimalkan jejak induktansi sepanjang jalur *ground*.

Hal ini juga harus dinyatakan bahwa tiap rangkaian individual blok “lokal” *bypass capacitor* terikat langsung dengan mereka. Tujuan dari kapasitor ini adalah untuk mem-*bypass* RF, sehingga seharusnya menjadi film atau kapasitor keramik (atau keduanya). Nilai yang baik untuk *bypassing logic device* adalah 0,01 MF *ceramic capacitor(s)*, didistribusikan sesuai kebutuhan. Jika rangkaian yang akan di-*bypass* menghasilkan pulsa arus yang besar (seperti saklar daya), kapasitas yang lebih besar diperlukan. Aluminium *electrolytic bypassed* dengan film dan kapasitor keramik merupakan pilihan yang baik. Ukuran yang tepat tergantung dari puncak arus, tetapi semakin besar kapasitor digunakan, semakin baik hasilnya.

Jika pengukuran lebih tepatnya diperlukan, kemungkinan dapat memaksa arus pada jalur menjadi masukan pada DC-DC converter menjadi DC dengan menggunakan L-C filter diantara sumber daya dan masukan pada *converter* seperti pada gambar 2.25.



Gambar 2.25 Penggunaan L-C filter di antara sumber daya dan switching regulator^[7]

Jika komponen L-C filter memadai, arus yang datang dari keluaran DC *power supply* akan menjadi arus (tanpa komponen saklar frekuensi

tinggi) yang berarti dapat diukur dengan akurat dengan *clip-on* ammeter dengan digital voltmeter yang murah.

Penting apabila ESR rendah dan besar ditempatkan pada Cin untuk mendukung masukan pada *switching converter*. LC filter yang meninjau kembali *converter* ke dalam sumber menghasilkan impedansi yang tinggi pada perpindahan arus.

2.3. Baterai (Akumulator)

Baterai atau akumulator adalah sebuah sel listrik di mana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel, adalah di dalam baterai dapat berlangsung proses perubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia, pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai.

Jenis sel baterai ini disebut juga *Storage Battery*, adalah suatu baterai yang dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak-balik (AC) terganggu.

Tiap sel baterai ini terdiri dari dua macam elektroda yang berlainan, yaitu elektroda positif dan elektroda negatif yang dicelupkan dalam suatu larutan kimia.

Menurut pemakaian baterai dapat digolongkan ke dalam 2 jenis:

- *Stationary* (tetap)
- *Portable* (dapat dipindah-pindah)

Baterai pada skripsi berfungsi sebagai media penyimpanan muatan yang bersumber dari sel surya, selain itu menjadi sumber cadangan saat sel surya tidak bekerja dengan optimal. Sebagai media penyimpanan muatan, batere dianggap beban bagi sel surya namun saat menggantikan peran sel surya, batere akan berfungsi sebagai sumber DC, sedangkan untuk sumber bagi beban AC, batere membutuhkan inverter untuk mengonversi tegangan DC menjadi AC.

2.3.1. Reaksi Kimia Baterai

Reaksi kimia internal baterai yang terjadi antara elektrolit dan elektroda metal negatif menghasilkan elektron bebas yang berkumpul pada terminal negatif baterai, sedangkan reaksi kimia yang terjadi antara elektrolit dengan elektroda positif menghasilkan ion positif yang berkumpul pada terminal positif baterai.

Setiap baterai memiliki setidaknya empat komponen :

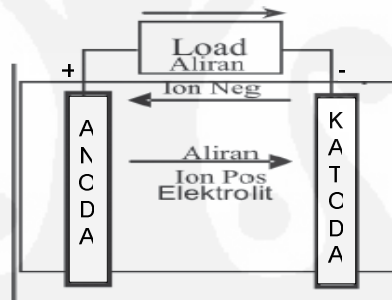
1. **Anoda** atau elektroda positif adalah elektroda reduksi, ini menghubungkan elektron dengan rangkaian eksternal dan teroksidasi selama *discharging*. Biasanya anoda menggunakan metal atau campuran tetapi juga hydrogen juga digunakan.
2. **Katoda** atau elektroda negatif adalah elektroda oksidasi. Katoda menerima elektron dari rangkaian eksternal dan direduksi selama *discharging*. Biasanya menggunakan *metallic oxide* atau sulfide tetapi juga menggunakan oksigen.
3. **Elektrolit** (konduktor ionik) dimana menyediakan media untuk transfer muatan sebagai ion-ion didalam cell antara anoda dan katoda. Elektrolit dapat berupa sebuah non-conductor dari elektron untuk menghindari self discharge dari cell. Larutan asam belerang (*Sulfuric Acid* = H_2SO_4) untuk baterai asam (*Lead Acid Storage Battery*) dan untuk baterai alkali adalah larutan alkali (*Potassium Hydroxide*) yang terdiri dari: *Nickel-Iron Alkaline Battery (Ni-Fe battery)* dan *Nickel-Cadmium Alkaline Battery (Ni-Cd battery)*.
4. **Pemisah/separator**, yaitu suatu bahan isolator yang digunakan untuk memisahkan ekektroda positif (+) dan elektroda negatif (-) agar tidak terjadi hubung singkat antara elektroda tersebut. Pada separator terdapat lubang-lubang dan alur yang halus untuk memberi jalan terhadap sirkulasi elektrolit bahan separator biasanya dari *ebonit* dan serat gelas.

2.3.2. Prinsip Kerja Baterai

1. Proses *discharge*

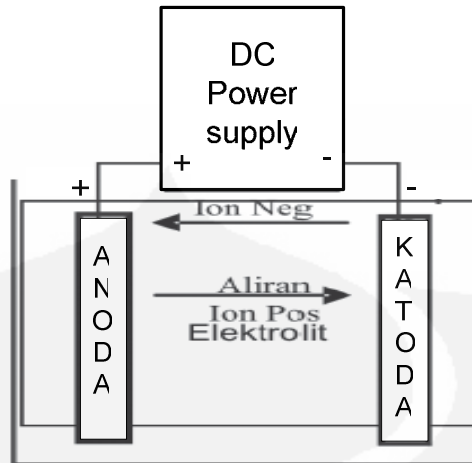
Saat baterai di-charge penuh, terdapat kelebihan elektron pada anoda, yang memberikan muatan negatif dan terjadi defisit pada katoda sehingga memberi muatan positif. Ketika rangkaian mengalirkan elektron yang berlebihan pada rangkaian eksternal, dari anoda dimana kehilangan muatan menuju katoda yang akan menerimanya, menetralisasi muatan positif. Aksi ini mengurangi beda potensial dari *cell*.

Ketika sel berlangsung sebagaimana ditunjukkan pada skema Gambar 2.26 Bila sel dihubungkan dengan beban maka elektron mengalir dari *anoda* melalui beban ke *katoda*, kemudian ion-ion negatif mengalir ke *anoda* dan ion-ion positif mengalir ke *katoda*.



Gambar 2.26 Proses pengosongan pengisian (*Discharge*) baterai ^[10]

Ketika proses pengisian sebagaimana ditunjukkan pada skema gambar 2.27 dibawah ini adalah bila sel dihubungkan dengan power supply, dimana kutub positif dihubungkan ke elektroda positif (anoda) dan dan kutub negatif dihubungkan ke elektroda negatif (katoda) dan proses kimia yang terjadi adalah seperti gambar 2.27 :



Gambar 2.27 Proses *charge* baterai ^[10]

Proses kimia yang terjadi adalah :

- Ion-ion negatif mengalir dari *katoda* ke *anoda*
- Ion-ion positif mengalir dari *anoda* ke *katoda*

1.3.3. Jenis-Jenis Baterai

Bahan elektrolit yang banyak dipergunakan pada baterai adalah jenis asam (*lead acid*) dan basa (alkali). Untuk itu di bawah ini akan dibahas kedua jenis bahan elektrolit tersebut.

1. Baterai Asam (*Lead Acid Storage Battery*)

Baterai asam bahan elektrolitnya adalah larutan asam belerang (Sulfuric Acid = H_2SO_4). Di dalam baterai asam, elektroda-elektrodanya terdiri dari pelat-pelat timah peroksida PbO_2 (*Lead Peroxide*) sebagai anoda (kutub positif) dan timah murni Pb (*Lead Sponge*) sebagai katoda (kutub negatif). Ciri-ciri umum (tergantung pabrik pembuat) sebagai berikut.

- Tegangan nominal per sel 2 Volt.
- Ukuran baterai per sel lebih besar bila dibandingkan dengan baterai alkali.
- Nilai berat jenis elektrolit sebanding dengan kapasitas baterai.
- Suhu elektrolit sangat mempengaruhi terhadap nilai berat jenis elektrolit, semakin tinggi suhu elektrolit semakin

rendah berat jenisnya dan sebaliknya.

- Nilai standar berat jenis elektrolit tergantung dari pabrik pembuatnya.
- Umur baterai tergantung pada operasi dan pemeliharaan, biasanya dapat mencapai 10–15 tahun, dengan syarat suhu baterai tidak lebih dari 20° C.
- Tegangan pengosongan per sel (*Discharge*): 2,0 – 1,8 Volt

2. Baterai Alkali (*Alkaline Storage Battery*)

Baterai alkali bahan elektrolitnya adalah larutan alkali (*Potassium Hydroxide*) yang terdiri dari:

- *Nickel-Iron Alkaline Battery (Ni-Fe battery)*
- *Nickel-Cadmium Alkaline Battery (Ni-Cd battery)*

Pada umumnya yang banyak dipergunakan di instalasi unit pembangkit adalah baterai alkali-cadmium (Ni-Cd). Ciri-ciri umum (tergantung pabrik pembuat) sebagai berikut.

- Tegangan nominal per sel 1,2 volt.
- Umur baterai tergantung pada operasi dan pemeliharaan, biasanya dapat mencapai 15–20 tahun, dengan syarat suhu baterai tidak lebih dari 20° C.
- Tegangan pengosongan per sel (*Discharge*): 1 Volt

2.4. Komparator *Operational Amplifier (Op-Amp)*

Operasional amplifier sering digunakan untuk membandingkan *amplitude* sebuah tegangan dengan tegangan yang lain. Pada aplikasi ini, op-amp digunakan dengan konfigurasi *open-loop*, dimana sebuah tegangan diberikan pada salah satu masukan dan tegangan referensi diberikan pada masukan yang lain.

Aplikasi dasar op-amp sebagai komparator adalah menentukan tegangan keluaran dengan membandingkan tegangan masukan yang diberikan dengan tegangan referensi. Perbedaan yang kecil saja antara tegangan input dengan tegangan referensi akan menyebabkan amplifier

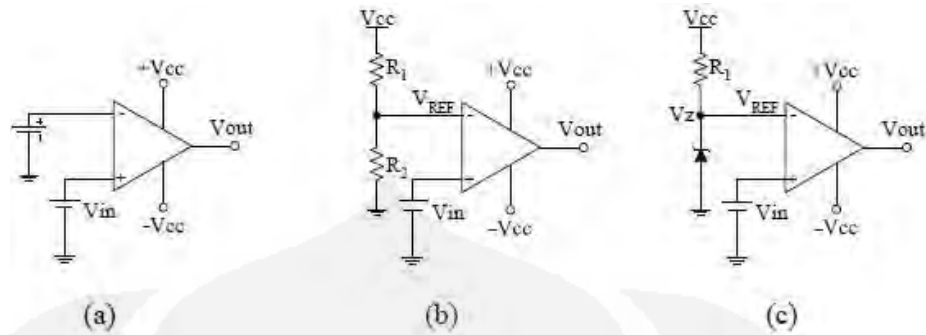
mencapai keadaan saturasi dan tegangan output bernilai sesuai dengan tegangan supply positif (V_+) atau tegangan supply negatifnya (V_-). Hal ini dapat terjadi karena penguatan tegangan pada konfigurasi *open-loop* adalah sangat besar.

Rangkaian dasar dari komparator dapat dilihat pada Gambar 2.28. Gambar 2.28(a) menunjukkan sebuah sumber tegangan tetap diberikan pada input inverting op-amp. Gambar 2.28(b) adalah rangkaian dasar komparator dengan menggunakan pembagi tegangan untuk mengatur tegangan referensi, sehingga tegangan referensi dapat ditentukan dengan rumus:

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{CC} \quad (2.17)$$

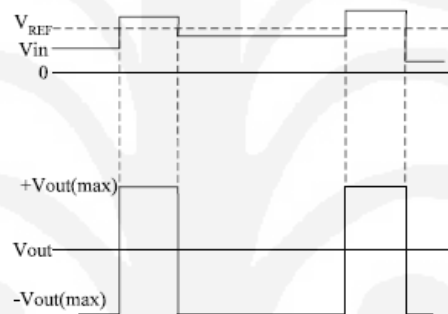
Gambar 2.28(c) adalah komparator yang menggunakan dioda zener untuk mengatur tegangan referensi ($V_{REF} = V_Z$). Selama tegangan masukannya bernilai lebih rendah daripada tegangan referensi, maka tegangan keluarannya berada pada level tegangan negatif maksimum. Sedangkan ketika tegangan masukan bernilai lebih tinggi daripada tegangan referensi maka tegangan keluarannya berada pada level tegangan positif maksimum.

Jika tegangan referensi yang digunakan adalah masukan pembalik (-) dan tegangan sinyal yang dimasukkan pada masukan tak membalik (+) sedikit lebih tinggi (beberapa ratus mikrovolt) dari tegangan referensi, maka tegangan keluarannya akan tinggi mendekati tegangan V_{CC} . Rangkaian ini disebut komparator tak membalik (non-inverting comparator). Jika tegangan referensi yang digunakan adalah masukan tak membalik (+) dan tegangan sinyal yang dimasukkan pada masukan membalik (-) sedikit lebih tinggi dari tegangan referensi maka tegangan keluarannya akan mendekati ground



Gambar 2.28 Rangkaian Dasar Komparator^[13]

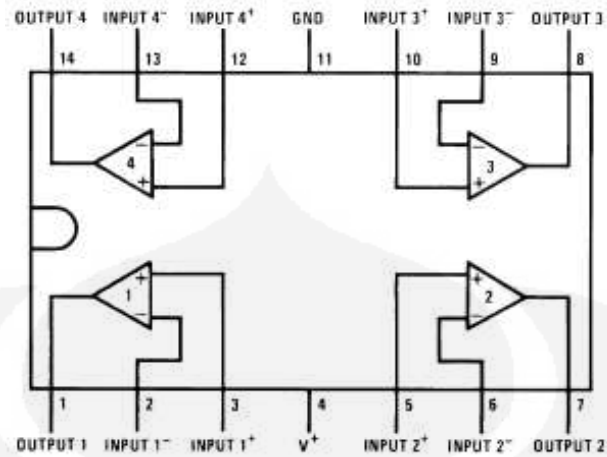
Gambar 2.29 menunjukkan tegangan output komparator dengan tegangan input tertentu diberikan pada input non-inverting komparator.



Gambar 2.29 Keluaran *non-inverting comparator*^[13]

2.5. LM324^[12]

LM324 adalah IC (Integrated Circuit) operational Amplifier (OpAmp) yang terdiri atas empat penguat yang masing-masing berdiri sendiri, berpenguatan tinggi dan secara interen terkompensasi terhadap frekuensi. Komponen ini dirancang untuk dioperasikan dari pencatu daya tunggal dalam rentang tegangan yang lebar. Pemakaian arus yang kecil tidaklah bergantung pada besar tegangan pencatu daya. Penerapannya meliputi : penguat pengalih (transduser), komparator (pembanding), blok-blok penguatan DC, dan semua rangkaian Opamp konvensional yang kini telah dapat dengan mudah dilengkapi pada sistem-sistem yang menerapkan pencatu daya tunggal. Gambar 2.30 menunjukkan pin diagram dari IC LM324.



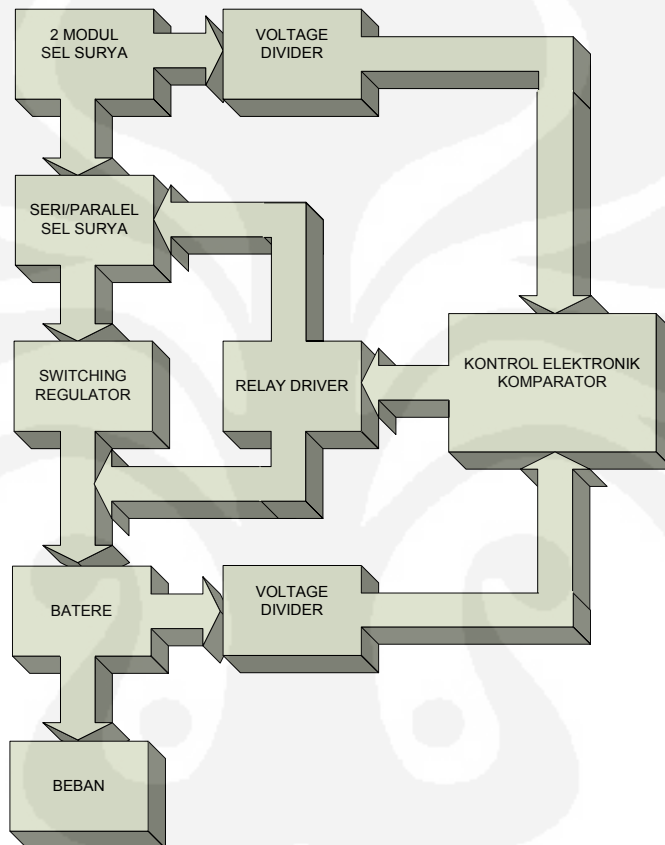
Gambar 2.30 Pin Diagram LM324^[12]

Keunggulan komponen LM324 adalah sebagai berikut :

1. Tidak memerlukan catu daya ganda
2. Empat OpAmp yang secara intern terkompensasi dalam satu kemasan tunggal.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1. Deskripsi Sistem



Gambar 3.1. Blok Diagram Sistem

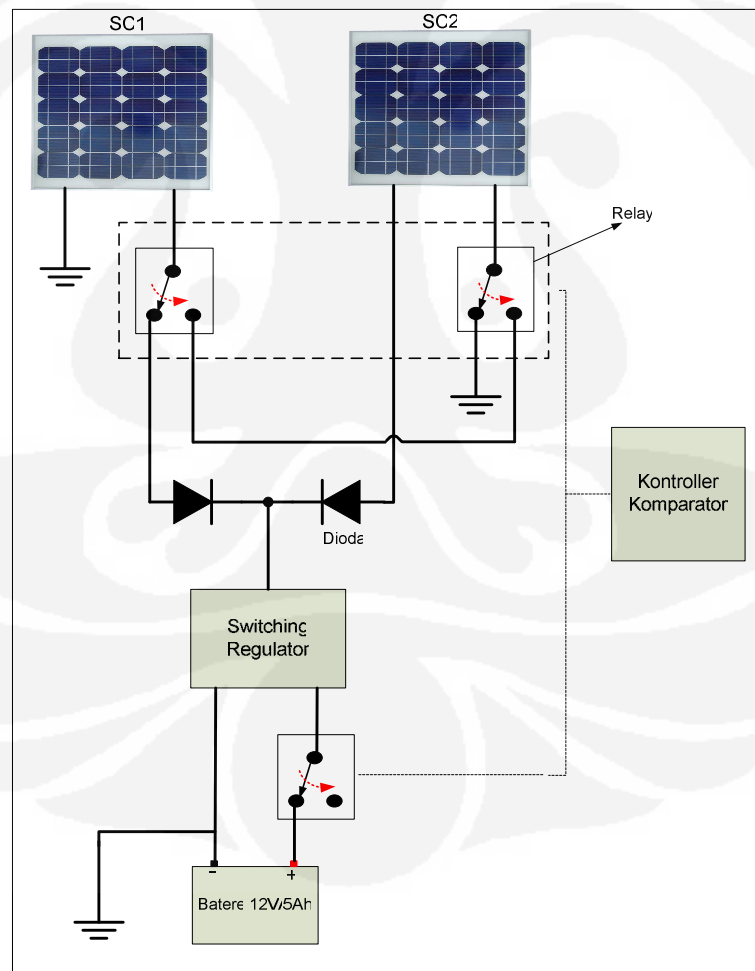
Diagram blok pada gambar 3.1 menggambarkan secara umum sistem yang bekerja pada alat kontroler elektronik Sel surya. Dua buah komponen Sel surya sebagai komponen yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. 2 komponen sel surya ini dapat dikontrol secara elektronik, sehingga dapat beroperasi secara hubung paralel atau seri, sesuai dengan kebutuhan keluaran yang diinginkan berdasarkan tinggi rendahnya intensitas cahaya matahari. Pada prinsipnya sel surya akan menghasilkan tegangan keluaran maksimal ketika intensitas cahaya matahari yang mengenai sel

surya tinggi, dan tegangan keluarannya akan menurun ketika intensitas cahaya matahari menurun.

Sistem elektronik ini menggunakan rangkaian komparator dan *driver relay* sebagai pengendalnya. Keluaran sel surya akan dikondisikan untuk masuk ke rangkaian pengendali komparator dengan menggunakan pembagi tegangan (*Voltage divider*). Baterai yang digunakan adalah baterai dengan spesifikasi 12V/5Ah, sehingga masukan yang digunakan untuk mengisi/men-charge baterai harus melebihi 12V sehingga penulis merencanakan tegangan keluaran yang digunakan dari sel surya sebesar 13V dengan menggunakan rangkaian *switching regulator*.

3.2. Perancangan Sistem

Gambar 3.2 memperlihatkan diagram perancangan sistem.



Gambar 3.2 Diagram Perancangan Sistem

Perancangan sistem yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 menjelaskan cara kerja sistem yang akan dirancang pada skripsi ini. Sistem menggunakan dua buah sel surya sebagai pengkonversi tenaga cahaya matahari menjadi tenaga listrik yang akan dikontrol konfigurasi-nya agar mendapatkan energi yang lebih optimal. Rekonfigurasi akan dikontrol oleh kontroler elektronik, yang berupa kontrol komparator dan relay sebagai *switcher*-nya. Dimana kontroler ini berdasarkan sinyal tegangan sel surya yang di kondisikan dengan *voltage divider* agar skala nilainya lebih kecil. Tinggi dan rendah atau naik dan turunnya nilai tegangan keluaran sel surya inilah yang menjadi tolak ukur kontroler untuk mengaktifkan relay. Selain itu, kontroler juga mengontrol pengisian dan pemutus pengisian baterai (*charge/discharge battery*). Dioda digunakan untuk penyearah arus kedua sel surya yang akan masuk ke rangkaian regulator karena memang keluarannya hanya satu yang akan masuk ke rangkaian regulator. Hasil arus dan tegangan sel surya yang terekonfigurasi kemudian distabilkan oleh rangkaian *switching regulator* sebelum diisi atau di-charge ke baterai.

3.2.1. Sel Surya

Pada perancangan sistem ini digunakan 2 buah sel surya, yang dirancang untuk hubung paralel atau serial sesuai deskripsi sistem pada gambar 3.2. Sel surya yang digunakan disini memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada tabel dibawah:

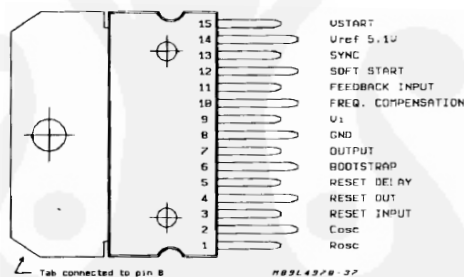
Tabel 3.1 Karakteristik spesifikasi sel surya ^[11]

Parameter Kelistrikan	Nilai
Maksimum Power (Pmax)	50 W
Open Circuit Voltage (Voc)	21,6 V
Short Circuit Voltage (Isc)	5,15 A
Voltage at point of maximum power (Vmpp)	17,3 V

Current at point of maximum power (I_{mpp})	4,63 A
Maximum system Voltage	600 V
Over current protection	10 A

3.2.2. Rangkaian *Switching Regulator*

Pada perancangan kontroller sel surya ini menggunakan *switching regulator* jenis *buck regulator*, yang memiliki prinsip operasi untuk mengonversi tegangan DC menjadi tegangan DC dengan nilai potensial yang lebih rendah dan polaritas yang sama. Nilai keluaran dari *switching regulator* ini di-set sebesar 13 V sebagai masukan untuk mengisi batere dan nilai tegangan masukan maksimumnya sebesar 40V. Pada gambar 3.3 memperlihatkan bentuk IC L4970A tampak depan, dimana IC ini memiliki 15 pin.



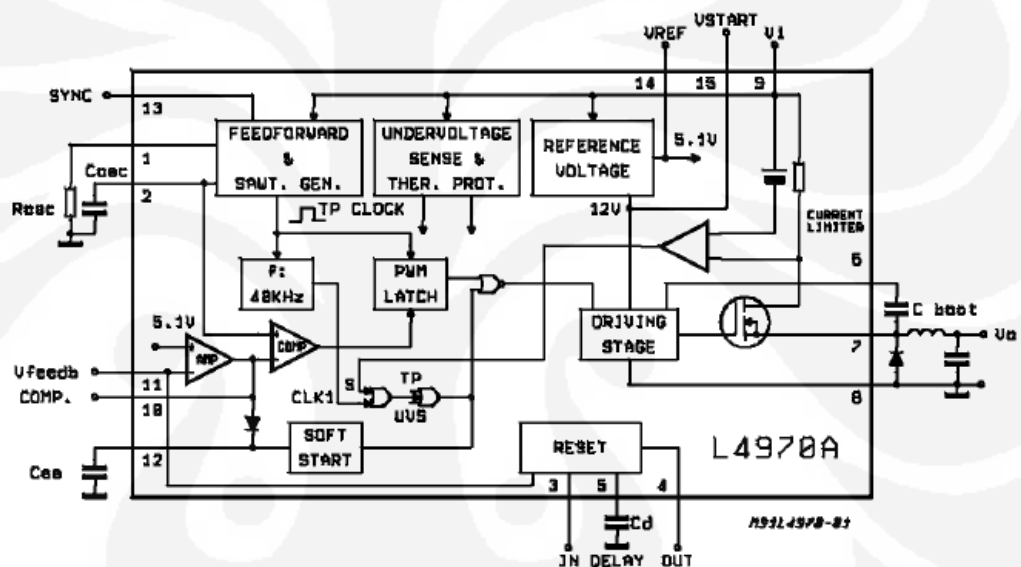
Gambar 3.3. Bentuk IC L4970A Tampak Depan ^[11]

Berdasarkan spesifikasi perencanaan rangkaian *switching regulator* diatas, maka penulis menggunakan rangkaian yang menggunakan *Integrated Circuit (IC) switching regulator* L4970A, dimana IC ini memiliki karakteristik :

1. Arus listrik keluaran 10 A
2. Jangkauan tegangan keluaran 5,1 V hingga 40 V
3. Jangkauan *duty cycle* dari 0 hingga 90%
4. *Internal feed-forward line regulation*
5. Pembatas arus listrik internal
6. Memiliki presisi 5,1 V $\pm 2\%$

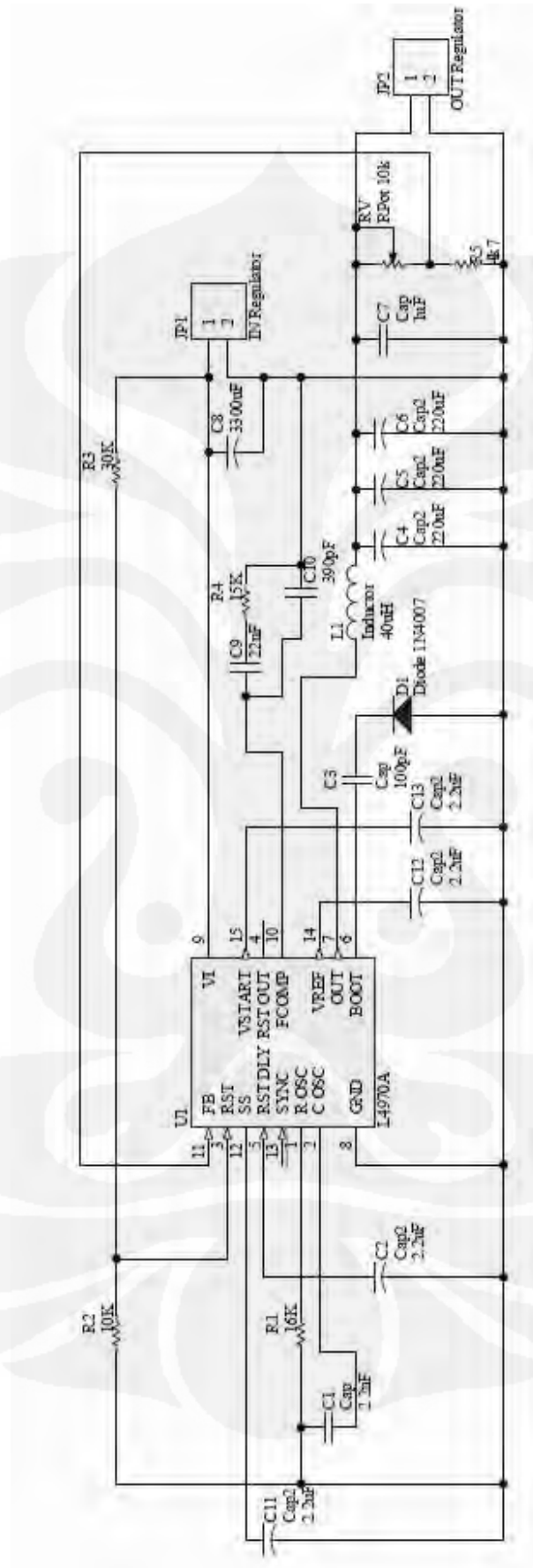
7. Mempunyai fungsi reset dan kegagalan daya
8. *Soft start*
9. Terdapat pin masukan dan keluaran yang sinkron
10. PWM untuk pulsa tunggal per-satuan waktu
11. Mempunyai efisiensi tinggi
12. Frekuensi switching hingga 500KHz

Blok diagram dari IC L4970A dapat dilihat pada gambar 3.4 dibawah:



Gambar 3.4 Diagram rangkaian dalam IC L4970A ^[11]

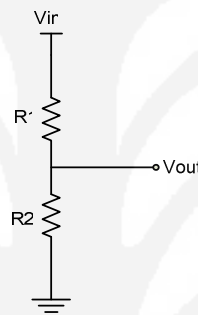
Masukan *switching regulator* ini berasal dari keluaran 2 buah sel surya yang dapat terhubung paralel ataupun seri yang dikontrol oleh elektronik kontroler berupa komparator dan *driver relay*. Pengaturan tegangan agar tegangan masukan sel surya ($V_{oc\ max}$ dari 2 sel surya yang dihubungkan seri = $2 \times 17,3\ V = 34,6\ V$ dan $I_{sc} = 4,63\ A$) agar menjadi tegangan keluaran sebesar $13\ V$ dan $I_{out} = 4\ A$ untuk tegangan pengisian baterai, yaitu dengan men-setting nilai $R_5 = 4,7\ k\Omega$ dan R_{pot} yang berupa resistor variabel sehingga nilai keluaran regulator sebesar $13\ V$. Gambar 3.5 memperlihatkan perancangan ``rangkain switching regulator.



Gambar 3.5. Rangkaian switching regulator dengan IC L4970A

3.2.3. Rangkaian Kontrol Komparator *Charge/discharge* Baterai

Ketika kondisi baterai sudah penuh, yaitu saat tegangan baterai 12V, sistem memerlukan rangkaian pemutus (*discharging*) baterai agar tidak terjadi kerusakan pada baterai. Pada perancangan ini, digunakan rangkaian komparator sebagai kontrolnya. Rangkaian komparator ini menggunakan voltage divider yang berfungsi untuk menurunkan dan mengatur nilai tegangan sesuai kebutuhan masukan kompaator dan tegangan referensinya. Gambar 3.6 menunjukkan rangkaian *voltage divider*.



Gambar 3.6 Voltage Divider

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} \times V_{in}$$

Tegangan batere perlu di atur untuk men-set sebagai masukan rangkaian komparator, dan sebagai nilai tegangan referensi pada rangkaian komparatornya diambil dari batere sebesar 6V untuk nilai tegangan batere minimal 12V.

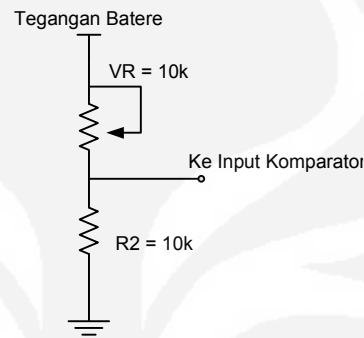
$$\Rightarrow V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} V_{in}$$

Mengatur agar V_{out} minimal batere (tegangan referensi) 12V menjadi 6 V kemudian nilai $R2$ diambil dengan harga $10k\Omega$, maka nilai $R1$ adalah :

$$\Rightarrow 6V = \frac{10k}{R1 + 10k} 12V$$

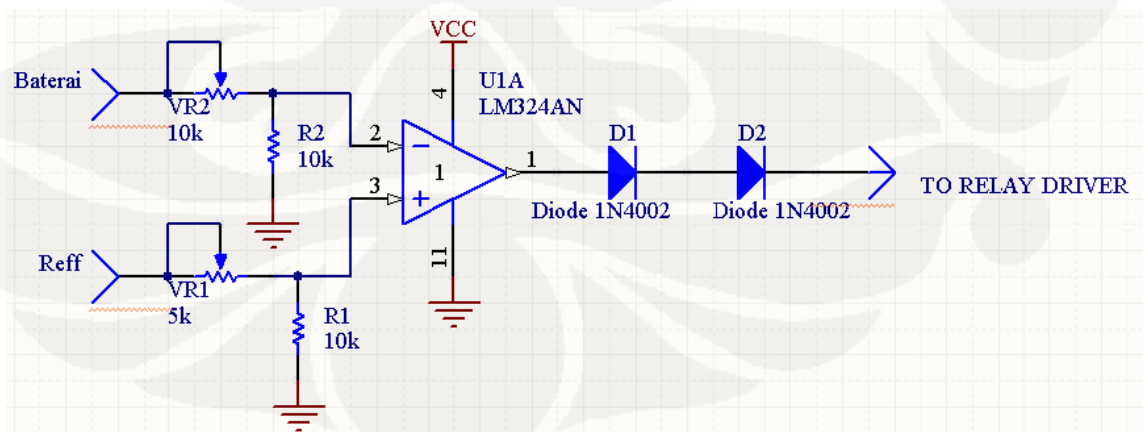
$$\Rightarrow R1 = \frac{120000 - 60000}{6} = 10000\Omega$$

Untuk nilai $R1 = 10k\Omega$, agar dapat diatur lebih presisi maka digunakan Variabel resistor (VR) sebesar $10k\Omega$. Gambar 3.8 menunjukkan perancangan rangkaian *voltage divider* tegangan baterai.



Gambar 3.7 Perancangan *Voltage Divider* Tegangan baterai

Dari perencanaan dimana ketika nilai tegangan masukan komparator lebih kecil dari tegangan referensi, maka keluaran komparator akan bernilai *high* untuk mengaktifkan relay agar suplay yang berasal dari sel surya mengisi baterai, sehingga dirancang rangkaian komparator dengan masukan membalik (*inverting comparator*). Gambar 3.8 menunjukkan perancangan rangkaian komparator op-amp untuk charge/discharge baterai.



Gambar 3.8. Perancangan rangkaian komparator op-amp untuk charge/discharge baterai.

3.2.4. Rangkaian Kontrol Komparator Rekonfigurasi Seri-paralel Sel surya

Rangkaian kontrol komparator untuk rekonfigurasi sel surya ini berfungsi untuk mengontrol konfigurasi hubungan dua buah sel surya yang digunakan pada rancang bangun ini. Perancangan sistem dengan merekonfigurasi susunan 2 buah sel surya ini berdasarkan prinsip bila sel surya dihubungkan seri maka tegangan yang dibangkitkan akan semakin besar tetapi arus yang dibangkitkan tetap. Sedangkan jika dihubungkan paralel maka arus yang dibangkitkan akan semakin besar tetapi tegangan yang dibangkitkan tetap.

Dengan prinsip diatas maka akan dirancang bahwa sel surya akan hubung seri ketika cahaya yang diserap sel surya tidak terlalu tinggi karena tegangan yang dihasilkan sel surya pada saat intensitas cahaya tidak terlalu tinggi akan semakin rendah. Sebaliknya ketika sel surya menyerap intensitas cahaya matahari yang tinggi, maka tegangan yang dihasilkan sel surya pun akan mendekati maksimum, sehingga hubung sel surya akan berubah menjadi konfigurasi paralel secara otomatis.

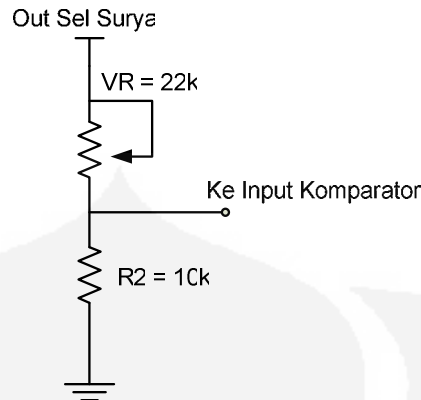
Rangkaian komparator untuk rekonfigurasi sel surya ini juga menggunakan *voltage divider* sebagai pengkondisi untuk tegangan masukan komparator untuk mengontrol hubungan sel surya dalam keadaan hubung paralel atau serial. Keluaran Sel surya minimal untuk hubungan paralel pada saat keluarannya 20,4 V. Nilai tegangan 20,4V ini merupakan syarat agar mendapatkan syarat tegangan pengisian baterai sebesar 13V.

Mengatur agar V_{out} (Tegangan Referensi) = 6,5V , dan nilai R2 diambil dengan harga 10k Ω . Maka nilai R1 adalah

$$\Rightarrow 6,5V = \frac{10k}{R1 + 10k} 20,4V$$

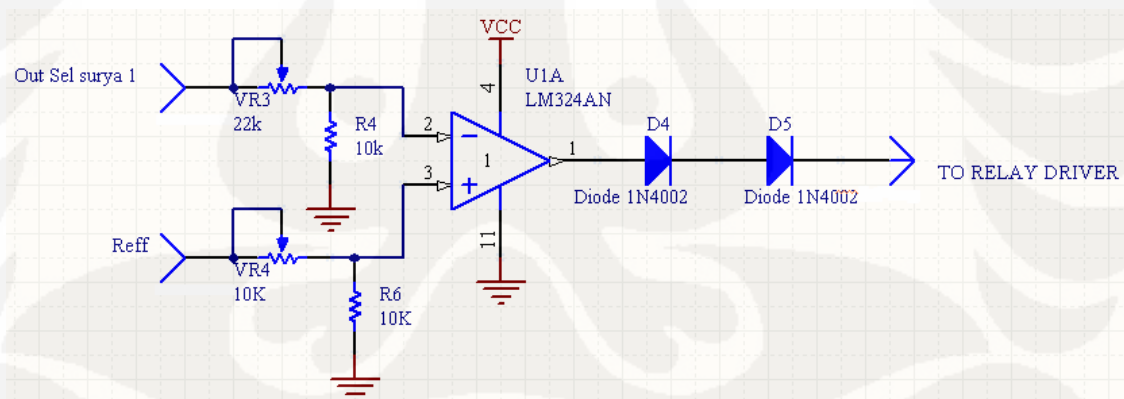
$$\Rightarrow R1 = \frac{2040000 - 65000}{6,5} = 21384\Omega$$

Untuk nilai R1 =10k Ω , agar dapat diatur lebih presisi maka digunakan Variabel resistor (VR) sebesar 22k Ω . Gambar 3.9 menunjukkan perancangan *voltage divider* untuk tegangan sel surya.



Gambar 3.9 Perancangan Voltage Divider Tegangan Sel Surya

Dari perencanaan, dimana ketika nilai tegangan keluaran 2 buah sel lebih kecil dari tegangan referensi, maka keluaran komparator akan bernilai *high* untuk mengaktifkan relay agar terjadi perubahan konfigurasi (rekonfigurasi), sehingga dirancang rangkaian komparator dengan masukan membalik (*inverting comparator*). Gambar 3.10 menunjukkan perancangan rangkaian komparator op-amp untuk charge/discharge baterai.

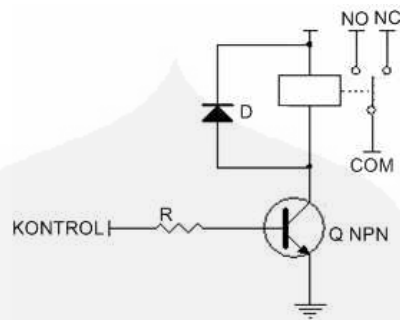


Gambar 3.10. Perancangan rangkaian komparator op-amp untuk Rekonfigurasi Seri-paralel Sel surya

3.2.5. Rangkaian Relay Driver

Rangkaian relay driver berfungsi sebagai pensaklaran pengisian muatan listrik dari switching regulator ke baterai dan rekonfigurasi seri/paralel sel surya. Rangkaian ini menggunakan relay *single pole double throw* (SPDT) dengan spesifikasi 12V/10A, resistor yang berfungsi sebagai

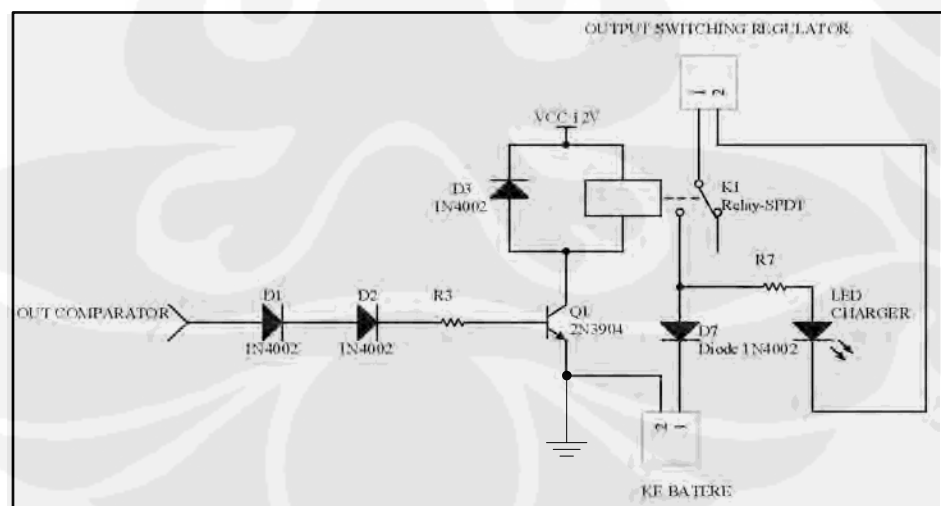
pembatas arus dan transistor sebagai switching arus yaitu 2N3904. gambar 3.11 menunjukkan rangkaian dasar *driver relay*.



Gambar 3.11 Rangkaian Relay Driver

Cara kerja masing-masing relay driver adalah sebagai berikut :

Yang pertama adalah rangkaian relay driver yang difungsikan sebagai pensaklaran untuk *Charging* atau *Discharging* dari batere. Keadaan awal dari dari relay, yaitu dalam keadaan *Normally Open* (NO), dimana batere dalam posisi *discharging*. Terminal COM dari relay dihubungkan ke *Output Switching Regulator*. Gambar 3.12 menunjukkan perancangan rangkaian *relay driver* untuk *charge/charging* baterai



Gambar 3.12 Perancangan Rangkaian *Relay Driver Charging/Discharging* Batere

Relay akan menghubungkan kontak pada saat relay aktif (saklar dalam kondisi tertutup) sehingga relay akan menghubungkan batere dengan

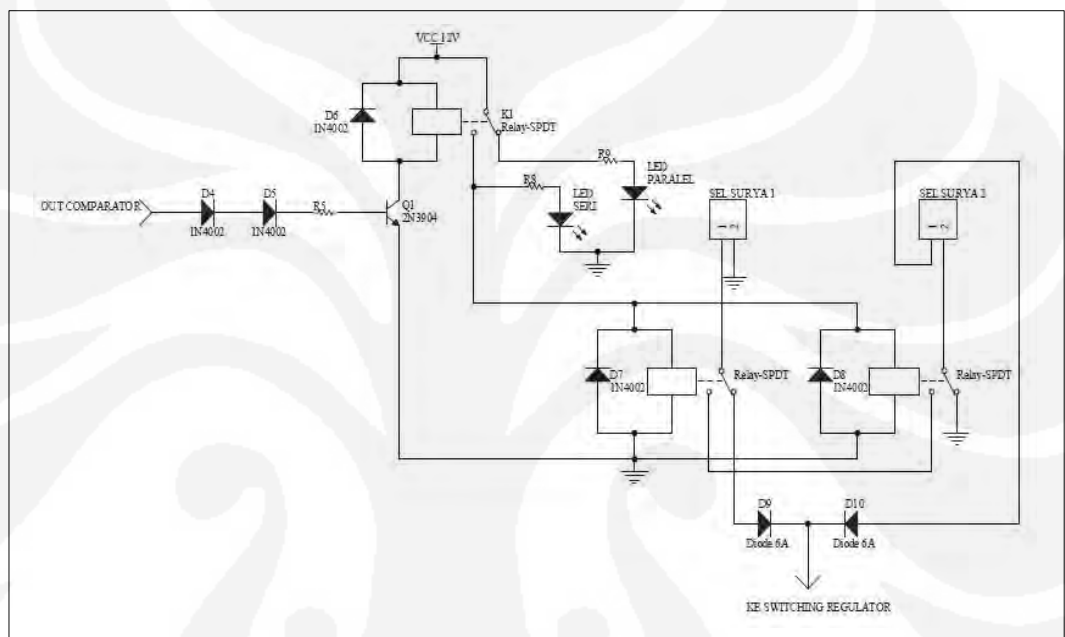
output *Switching Regulator* dan dalam hal ini batere dalam posisi *charging*. Rangkaian relay driver ini dipicu oleh suatu sinyal tegangan dari rangkaian komparator yang membandingkan antara tegangan batere dan tegangan referensi. Sinyal kontrol yang berasal dari komparator mengkondisikan transistor pada kondisi saturasi atau *cutoff*-nya. Bila sinyal kontrol bernilai high maka nilai $V_{BE} > 0,95 \text{ V}$, sehingga transistor saturasi. Resistor $1\text{k}\Omega$ berfungsi untuk membatasi arus yang mengalir pada basis transistor, yaitu sebesar 5mA , yang disesuaikan dengan V_{BE} saturasi. Penggunaan dua buah dioda 1N4002 difungsikan agar membuang sisa tegangan saat relay menghasilkan keluaran *low*, yaitu agar *fix* 0V , karena op-amp yang digunakan berorientasi *ground*.

Saat keluaran komparator memberikan masukan High, akan ada arus yang melewati kawat kumparan pada relay sehingga timbul medan magnet yang akan menarik saklar dari posisi NC ke NO. Pada kondisi sebaliknya, maka transistor *cutoff* sehingga relai kembali berada dalam kondisi normal (NC). Dioda dipasang paralel dengan terminal kumparan relay dengan arah arus menuju VCC. Hal ini dilakukan untuk melindungi relay dari kerusakan dari adanya tegangan (GGL) balik yang tergenerasi pada kumparan relay saat transistor tidak aktif.

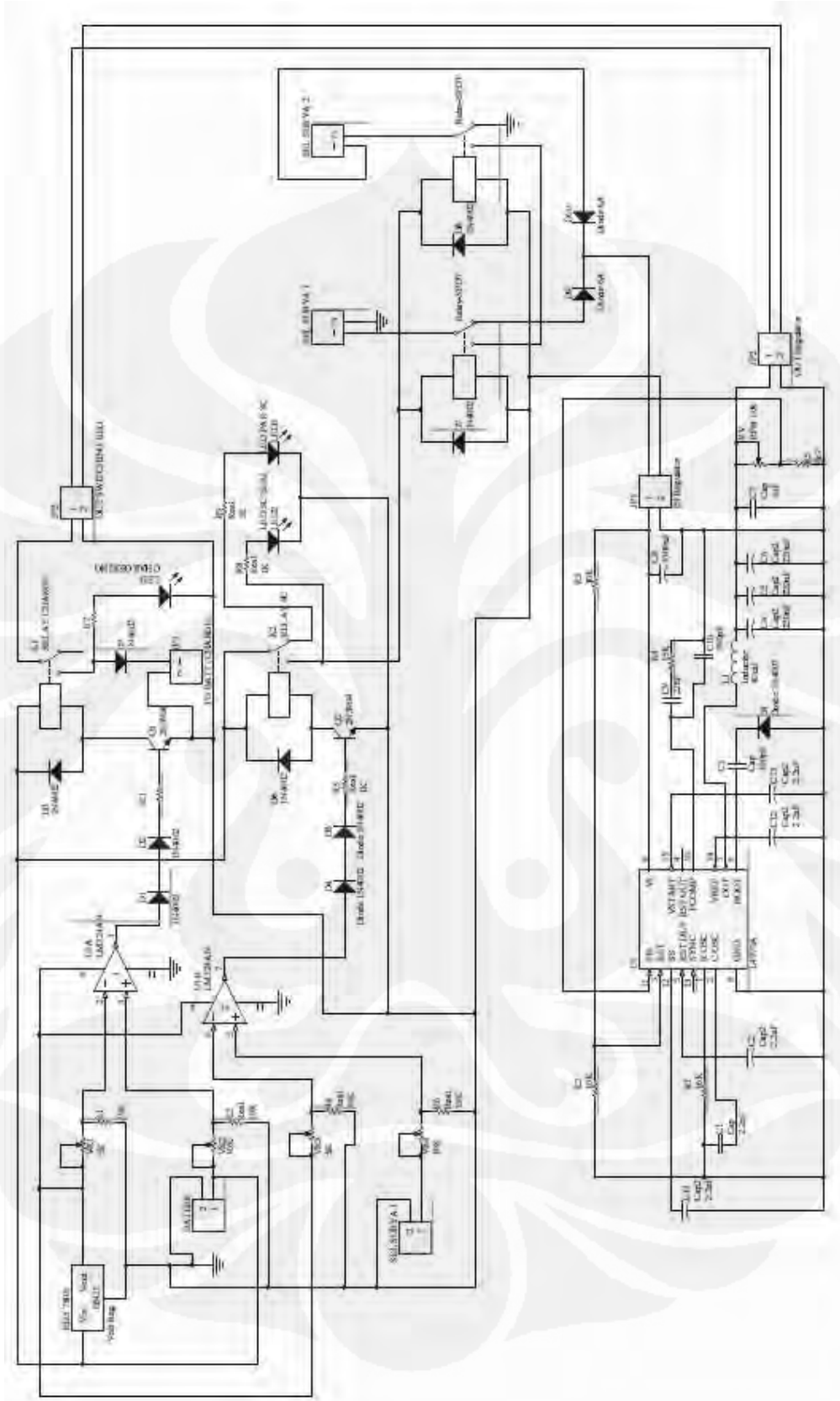
Selain itu Light-emitting diode (LED) yang juga terpasang paralel terhadap kumparan relay. LED ini berfungsi sebagai indikator untuk memperlihatkan bahwa batere dalam keadaan *charging* atau *discharging*. Ketika transistor saturasi, arus yang melewati kumparan relay akan menyalakan LED yang menginformasikan bahwa batere sedang dalam keadaan Charging.

Yang kedua adalah rangkaian *relay driver* yang difungsikan sebagai pensaklaran untuk sel surya hubung paralel dan seri. Untuk perancanganya sama seperti rangkaian relay untuk *charging/discharging* batere. Namun untuk penggunaan terminal NO, NC, dan COM nya yang berbeda. Pada rangkaian ini, terminal NO dihubungkan ke rangkaian rangkaian relay hubung paralel dan seri

sedangkan terminal COM nya dihubungkan ke VCC 12V. dengan rencana jika relay aktif, maka rangkaian relay seri/paralel akan mendapatkan catu 12V, sehingga relay seri/paralel pun aktif dan membentuk suatu hubungan seri pada sel surya nya, namun dalam keadaan normal, relay seri/paralel akan membentuk hubungan paralel. Rangkaian nya dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan 3.14 menunjukkan perancangan rangkaian skematik keseluruhan sistem.



Gambar 3.13 Perancangan Rangkaian *Relay Driver* Rekonfigurasi Seri/Paralel Sel Surya



Gambar 3 14 skematik perancangan sistem

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1. Deskripsi Pengujian dan analisis

Deskripsi pengujian dan analisis yang dilakukan pada skripsi adalah menguji hasil perancangan sistem Rancang Bangun Pengendali Pengisian Arus Sel Surya Dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel yang telah direalisasikan ke dalam PCB (*printed circuit board*), yaitu antara lain :

1. Menguji 2 buah divais sel surya yang digunakan pada sistem dengan mengukur tegangan dan arus sesuai spesifikasi parameter sel surya dan karakteristiknya.
2. Menguji rangkaian *switching regulator* sebagai pengendali arus dan tegangan yang digunakan pada sistem sesuai perancangan pada bab 3.
3. Menguji sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dari paralel ke seri atau sebaliknya berdasarkan perancangan pada bab 3.
4. Menguji dan menganalisis tegangan dan arus sistem *charge* dan *discharge* dari baterai berdasarkan parancangan pada bab 3.

4.2. Target Pengujian

Target pengujian ini adalah mendapatkan dan menganalisa hasil pengukuran modul pada masing-masing blok (blok sel surya, blok sirkit switching regulator, blok sirkit kendali rekonfigurasi sel surya, *charge* dan *discharge* baterai dan blok baterai) pada sistem Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel sesuai deskripsi pengujian dan perancangan sehingga dapat mengambil kesimpulan dari analisisnya.

4.3. Pengujian

4.3.1. Daftar Peralatan dan Bahan Pengujian

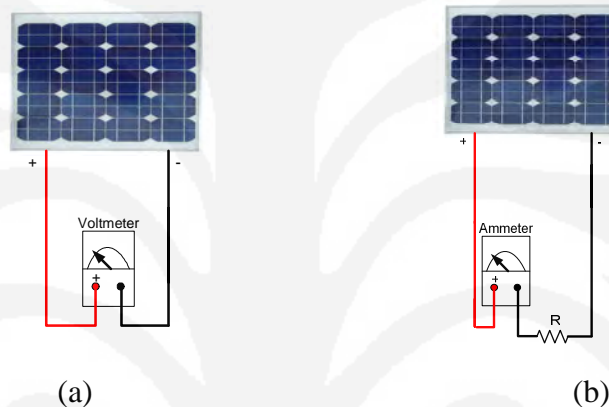
1. Modul Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel, yang terdiri dari :
 - a. 2 unit sel surya 50Wp
 - b. 1 unit sirkit pengendali arus dan

- c. 1 unit sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dari paralel ke seri atau sebaliknya, dan 1 baterai 12V/65Ah.
2. Alat ukur multimeter digital merk CONSTANT dan multi meter analog merk SANWA.

4.3.2. Konfigurasi pengujian

4.3.2.1. Konfigurasi pengujian blok sel surya

Gambar 4.1 menunjukkan konfigurasi pengujian sel surya dengan mengukur arus dan tegangan keluarannya.

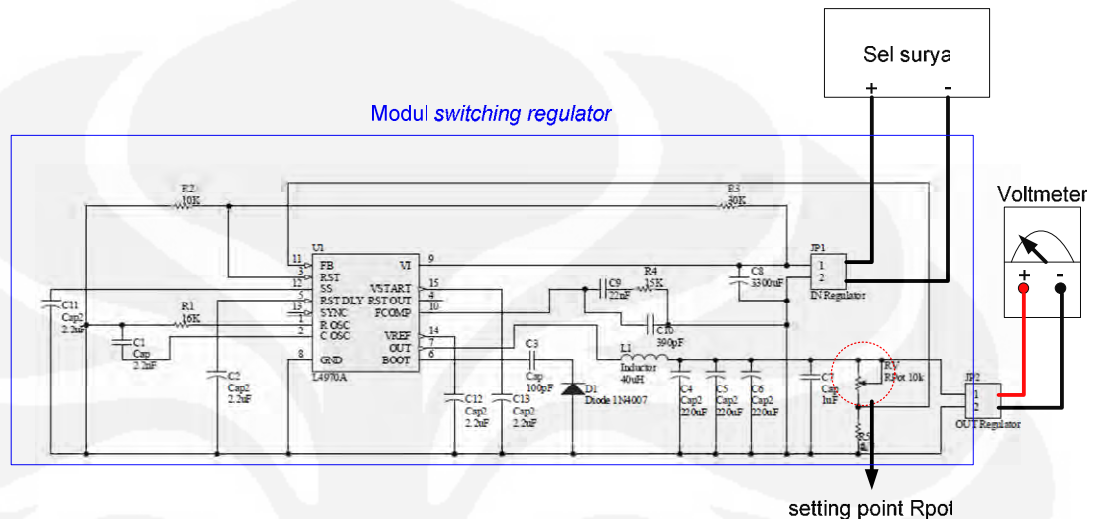


Gambar 4.1 Konfigurasi pengujian untuk mengukur tegangan sel surya (a) dan arus sel surya (b)

Pada pengujian pengukuran tegangan dan arus sel surya ini, awalnya tanpa beban untuk mengetahui apakah sel surya berjalan sesuai spesifikasi karakteristik sel surya yang digunakan. Tabel 3.1 menunjukkan karakteristik sel surya yang digunakan sebesar 21,6V namun dalam pengukurannya nilai tegangan (V_{oc}) keluaran sel surya tanpa beban sebesar 19V. Hal ini dimungkinkan karena kondisi irradiansi matahari yang tidak maksimal dan temperatur dibawah *standart test condition* (STC) yaitu 25°C, karena saat pengambilan data cuaca agak mendung. Nilai tegangan keluaran sel surya akan berubah-ubah sesuai dengan kondisi cahaya matahari yang diserap sel surya. Semakin tinggi intensitas cahaya matahari yang diserap semakin tinggi arus dan tegangan yang dikeluarkan, begitu juga sebaliknya.

4.3.2.2. Konfigurasi pengujian blok *switching regulator*

Gambar 4.2 memperlihatkan konfigurasi pengujian rangkaian *switching regulator*.



Gambar 4.2 Konfigurasi pengujian rangkaian *switching regulator*

Konfigurasi diatas merupakan pengujian sirkit *switching regulator* yang tujuannya menguji apakah sirkit berjalan sesuai dengan perancangan atau tidak. Hal ini dilakukan dengan menggunakan input berupa suplai *voltage variabel*. Hasil yang didapatkan dicatat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data pengujian *switching regulator*

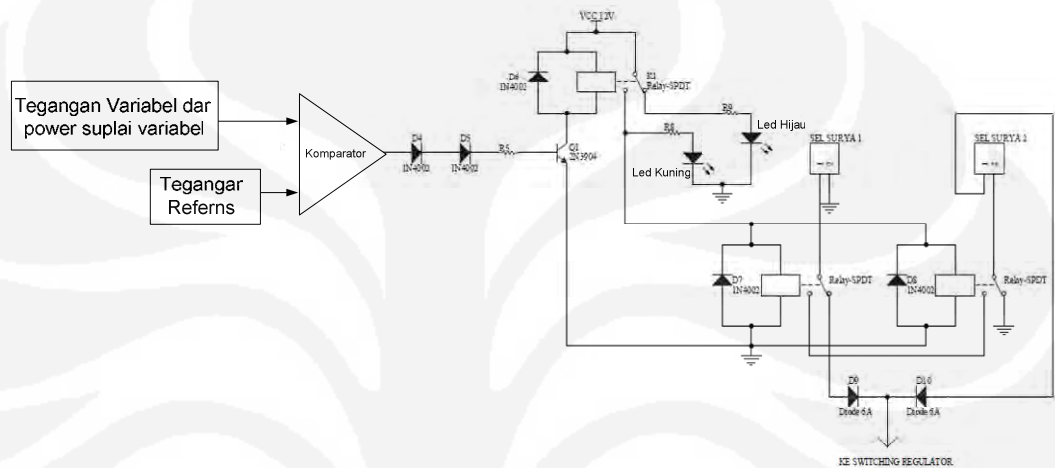
No	Vin (V)	Vout (V)
1	12	4,7
2	15	7,7
3	18	10,7
4	21	13,7

Dari hasil pengujian pada Tabel 4.1 diatas dapat dilihat bahwa tegangan keluaran *switching regulator* cukup stabil, yang artinya sesuai dengan perancangan. Akan tetapi dilihat dari hasilnya dimana nilainya memiliki pesisi 7,3V terhadap inputnya, sedangkan berdasarkan spesifikasi IC yang digunakan adalah memiliki presisi 5,1V, sehingga terdapat selisih 2,2V.

4.3.2.3. Konfigurasi Pengujian sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dan charge/discharge baterai.

Pengujian sirkit kendali rekonfigurasi sel surya

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sirkit ini berjalan sesuai perancangan atau tidak. Dengan memberikan input variabel sebagai simulasi tegangan sel surya seperti ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Konfigurasi pengujian sirkit kendali rekonfigurasi paralel-seri sel surya

Tabel 4.2 Pengujian sirkit Rekonfigurasi Paralel/seri Sel surya

No	Vin (V)	Led Hijau	Led Kuning
1	20,4	On	Off
2	20,3	Off	On
3	15	Off	On
4	13	Off	On

Keterangan : Led Hijau menunjukkan konfigurasi Paralel

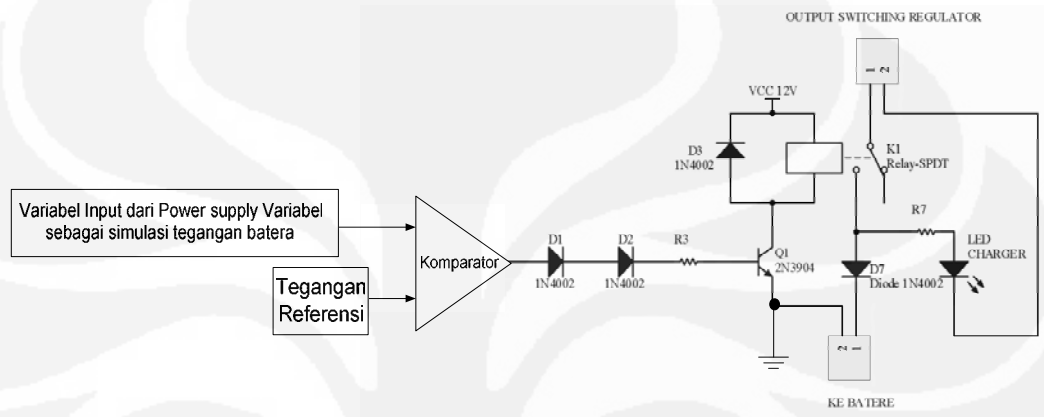
Led Kuning Menunjukkan konfigurasi seri

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel, sirkit berjalan sesuai dengan perancangan, yaitu sirkit akan tetap beroperasi dengan konfigurasi paralel ketika tegangan masukannya diatas atau sama dengan 20,4V dengan menyalnya indikator led hijau (sesuai perancangan) dan begitu pula ketika masukan komparator dibawah 20,4V maka relay akan aktif

agar sel surya beroperasi secara seri dengan menyalnya indikator led kuning. Dengan demikian sirkit berjalan sesuai dengan perancangan.

Pengujian sirkit kendali rekonfigurasi sel surya

Gambar 4.4 memperlihatkan konfigurasi pengujian sirkit kendali *charge/discharge* baterai pada sistem.

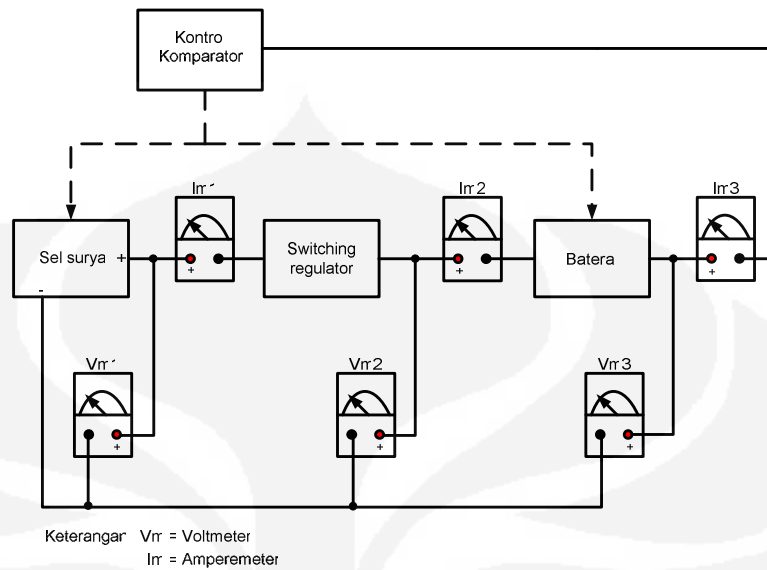


Gambar 4.4 Konfigurasi pengujian sirkit kendali charge/discharge baterai.

Pada pengujian sirkit pengendali *charge/discharge* baterai ini digunakan masukan berupa tegangan variabel dari power suplai variabel. Ketika diberikan masukan dibawah tegangan 12V relay aktif dengan indikator led merah yang menyala, dan ketika diberikan masukan yang lebih besar atau sama dengan 12V, relay kembali ke posisi off dengan indicator led yang off juga. Dengan demikian sirkit pengendali *charge/discharge* baterai telah sesuai perancangan pada bab III.

4.3.2.4. Konfigurasi pengujian sistem

Gambar 4.5 memperlihatkan konfigurasi pengujian sistem.



Gambar 4.5 Konfigurasi pengujian sistem

Pengujian sistem ini dilakukan dengan mengukur tegangan dan arus pada keluaran masing-masing blok seperti Gambar 4.5. Hasil uji coba dimasukkan ke dalam lampiran 1 yang berisi data-data pengukuran tegangan masukan, tegangan keluaran. Dan indikator kontrol komparator yang mengindikasikan kendali rekonfigurasi sel surya dan *charge/discharge* baterai. Pengujian juga diperjels dengan foto pada saat pengukuran di laboratorium pada Lampiran.

4.4. Analisis Data Sistem

4.4.1. Analisis Rangkaian *Switching Regulator*

Pada perancangan rangkaian *switching regulator* ini digunakan untuk sirkit pengendali arus dan tegangan jenis *buck regulator*, yang memiliki prinsip operasi untuk mengonversi tegangan DC menjadi tegangan DC dengan nilai potensial yang lebih rendah dan polaritas yang sama. Nilai keluaran dari *switching regulator* ini di-set sebesar 13 V sebagai masukan untuk mengisi baterai dan nilai tegangan masukan maksimumnya sebesar 40V. pada skripsi ini penulis menggunakan IC *Switching regulator* L4970A Pada datasheet L4970A telah tersedia rangkaian yang dapat digunakan, dengan menyesuaikan pemilihan dan nilai komponen didalamnya, untuk

mendapatkan keluaran yang diinginkan. Rangkaian ini dapat mengatur keluarannya dengan mengatur potensiometer **Rpot** hingga mendapatkan output yang diinginkan.

Pada hasil percobaan (Tabel Lampiran 1) terlihat tegangan masukan yang diberikan berubah-ubah, sehingga dapat dilihat, selama tegangan yang dihasilkan sel surya tersebut berada pada tegangan $\geq 20,4V$ maka *switching regulator* baru akan mampu memberikan tegangan keluaran 13V sebagai syarat tegangan pengisian baterai. Keadaan 2 buah sel surya masih berkonfigurasi paralel karena tegangan sel surya belum melewati batas referensi kontrol komparator yang telah di-*setting* agar sel surya beroperasi dengan konfigurasi paralel. Namun ketika tegangan sel surya turun di bawah menjadi 20,3 maka *switching regulator* tidak mampu memberikan keluaran sebesar 13 V, yaitu dibawahnya, sehingga melewati batas aturan pengisian baterai. Oleh karena itu keadaan 2 buah sel surya akan berubah konfigurasinya menjadi seri, untuk mendapatkan tegangan lebih dari 20,4V agar *switching regulator* mampu menghasilkan keluaran sebesar 13V.

Presisi output tegangan regulator pada sistem = 7,3V terhadap inputnya. Berbeda dengan spesifikasi IC sebenarnya yang digunakan yaitu 5,1V, Ini dimungkinkan karena adanya drop tegangan pada rangkaian sistem sebesar 2,2V.

Switching regulator ini cocok untuk penggunaan pembatasan tegangan (*regulated voltage*) sesuai yang diinginkan dengan range tegangan yang besar yaitu bisa mencapai 40V yang berarti jika menggunakan 2 buah sel surya dengan jenis yang sama seperti yang digunakan pada skripsi ini dan dipasang secara seri, maka faktor kekurangan tegangan akibat kurangnya tegangan pada sel surya dapat diatasi.

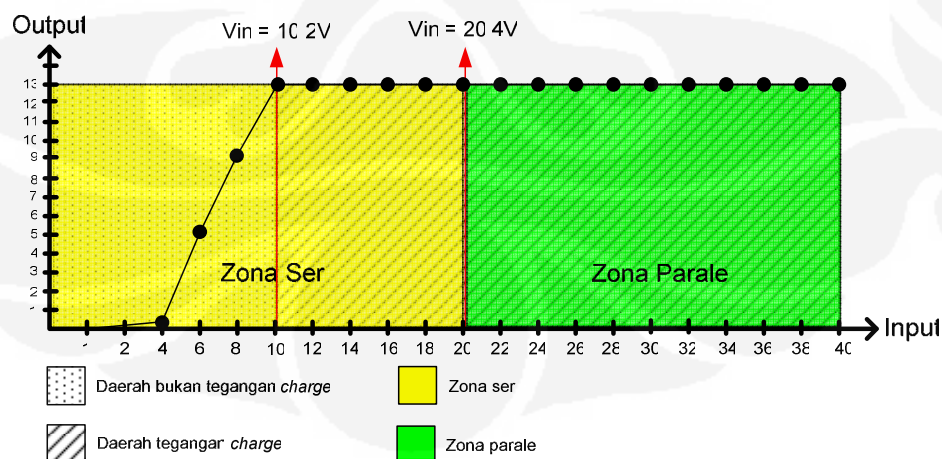
4.3.3. Analisis sirkit kendali rekonfigurasi paralel-seri sel surya dan baterai

Pada perancangan sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dan *charge/discharge* baterai pada sistem ini adalah mengontrol rekonfigurasi paralel atau seri dari 2 buah sel surya yang digunakan berdasarkan tegangan keluaran sel surya dan mengontrol *charge* baterai ketika tegangan baterai kurang dari syarat penuhnya baterai yaitu dibawah tegangan 12V atau *discharge* baterai ketika baterai sudah penuh yaitu ketika tegangannya telah

mencapai 12V. Maka secara otomatis sistem akan memutus pengisian baterai ketika baterai sudah penuh.

Untuk sistem rekonfigurasi sel surya, pada hasil pengujian yang ditunjukkan Table 1 pada Lampiran 1, yaitu sistem akan secara otomatis merekonfigurasi hubungan sel surya agar tetap menghasilkan keluaran sebesar 20,4V. Berdasarkan hasil percobaan didapat bahwa sistem akan menunjukkan konfigurasi seri ketika output sel surya $\leq 20,3V$, dan sistem akan merubah konfigurasi menjadi paralel ketika out sel surya $\geq 20,4V$.

Hal ini disimulasikan dengan memasukkan tegangan masukan *variabel voltage* (pada bagian pengujian) pada sistem. Berdasarkan hasil pengujian sirkit ini, dengan memberikan masukan tegangan mulai pada pada tabel 4.2, saat keluaran sel surya 20,4V, *switching regulator* menghasilkan tegangan keluaran 13V dimana nilai tegangan ini adalah syarat untuk mengisi baterai sehingga pada saat ini belum perlu untuk merekonfigurasi sel surya menjadi seri. Akan tetapi ketika tegangan keluaran sel surya yang dibaca oleh kontrol komparator kurang dari 20,4V berdasarkan pengujian sistem pada tabel 4.2 yaitu 20,3V maka jika dihitung berdasarkan presisi dari *switching regulator* adalah $20,3V - 7,3V = 13V$, maka tidak memenuhi syarat dari tegangan pengisian baterai. Dengan kondisi seperti itu maka kontrol komparator yang telah di atur tegangan referensinya akan memberikan sinyal untuk merubah konfigurasi sel surya menjadi seri. Gambar 4.6 memperlihatkan kurva hasil pengujian sistem.



Gambar 4.6 kurva input (sel surya) terhadap keluaran sistem

Dari hasil kurva diatas menunjukkan bahwa rentang tegangan masukan untuk konfigurasi seri mulai dari 0V sampai 20,3V, dimana untuk menghasilkan

tegangan syarat pengisian baterai (13V) pada saat masukannya sebesar 10,2V. Daerah ini ditunjukkan dengan warna kuning. Dan saat masukan dari sel surya sebesar 20,4 maka sistem sel surya ber-rekonfigurasi menjadi paralel, ini ditunjukkan pada daerah warna hijau. Keluaran sistem sebesar 13V hingga masukan maksimum sebesar 40V.



BAB 5

KESIMPULAN

- 1 Perancangan Sistem elektronik pengendali pengisian arus sel surya ini, didefinisikan sebagai 2 unit sel surya 50Wp, 1 unit sirkit pengendali arus dan 1 unit sirkit kendali rekonfigurasi sel surya dari paralel ke seri atau sebaliknya, dan 1 baterai 12V/65Ah.
- 2 Implementasi untuk sistem ini memiliki output presisi 7,3V terhadap inputnya. Sehingga nilai minimum untuk konfigurasi paralel pada sel surya adalah $\geq 20,4V$.
- 3 Dari hasil kurva analisis, sistem akan merekonfigurasi sel surya menjadi susunan seri ketika tegangan sel surya tidak lebih sama dengan 20,3V, dan akan menjadi paralel ketika tegangannya mencapai 20,4V.
- 4 Arus pengisian baterai maksimal = 3,5A yang pengaturannya dilakukan pada rangkaian switching regulator berdasarkan aplikasi pada datasheetnya.
- 5 Secara otomatis akan *dicharging* ketika baterai mencapai tegangan minimal yang telah ditentukan, sehingga baterai tidak akan berada dalam keadaan kosong

DAFTAR REFERENSI

- [1]. I Made Ardita, Catur Wahyu Prasetyo, Agung Sulisty. *Optimasi Pemanfaatan Energi Terbarukan Lokal Untuk Pembangkit Tenaga Listrik Dengan Menggunakan Skenario Energi Mix Nasional*. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II 2008 Universitas Lampung.
- [2]. Situs Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Energi Surya dan Pengembangannya di Indonesia, 24 September 2009.
(<http://majalahenergi.com/forum/Energi-Surya>)
- [3] Pendahuluan Fisika Zat Padat (Kristal Semikonduktor). <file.upi.edu/ai.php>
- [4] <http://energisurya.wordpress.com>
- [5] Honsberg, Christiana & Bowden, Stuart. *Photovoltaic: Device, Systems, and Application PVCDROM 1.0*
- [6] Kholid Ramadhani & Prof. Dr. Syafsir Akhlus, MSc. *Pengaruh Hubungan Seri-Paralel Pada Rangkaian Sel Surya Pewarna Tersensitisasi (Sspt) Terhadap Efisiensi Konversi Energi Listrik*. Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Proseding TA 2008.
- [7] Insan, Muhammad. (2009, Agustus). *Implementasi Switching Regulator untuk Komputer Bergerak Dengan Menggunakan Tenaga Surya*. Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro.
- [8] Hebertt Sira-Ramírez and Ramón Silva-Ortigoza. *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*
- [9] Dasar Teori Buck Converter. www.scribd.com
- [10] Andri, Helly. (2010, July). *Rancang Bangun System Battery Charging Automatic*. Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro.
- [11] STMicroelectronics, L4970, 10A Switching Regulator. <http://alldatasheet.com>
- [12] Data sheet LM324. <http://alldatasheet.com>

LAMPIRAN 1

DATA HASIL PENGUJIAN PENGUJIAN ALAT

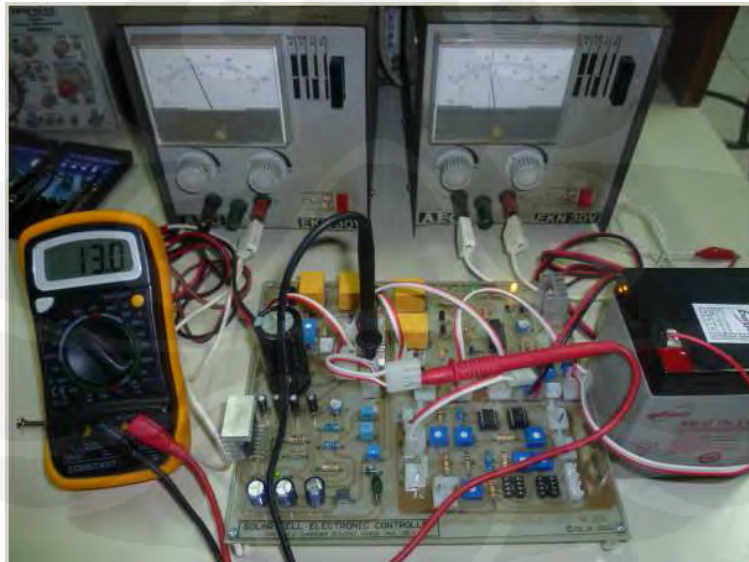
- Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro UI
 Hari/Tanggal : Senin/13 Desember 2010
 Alat dan Bahan :
1. Modul Sistem Rancang Bangun Sistem Pengendali Pengisian Arus Sel Surya Dengan Rekonfigurasi Seri-Paralel.
 2. 2 buah Voltage Variabel maksimum 40V/3A.
 3. 2 buah Multimeter Digital dan Analog
 4. Kabel Pelengkap

Tabel 1 Data Hasil Pengujian

No	SC1 (Vm1)	SC2	Konfigurasi SC			Out Regulator (V)
			Seri	Paralel	V (Vm2)	
1	0	0	√		0	0
2	1	1	√		2	0.001
3	2	2	√		4	0.004
4	4	4	√		8	0,7
5	6	6	√		12	4.69
6	8	8	√		16	8.7
7	10	10	√		20	12.7
8	10.2	10.2	√		20.4	13.0
9	11	11	√		22	13.03
10	12	12	√		24	13.03
11	14	14	√		28	13.03
12	16	16	√		32	13.03
13	18	18	√		36	13.03
14	20	20	√		40	13.03
15	20,3	20,3	√		40,4	13.03
16	20.4	20,4		√	20,4	13.03
17	22	22		√	21	13.03
18	24	24		√	23	13.03

LAMPIRAN 2**FOTO PENGUJIAN ALAT****Foto 1 :**

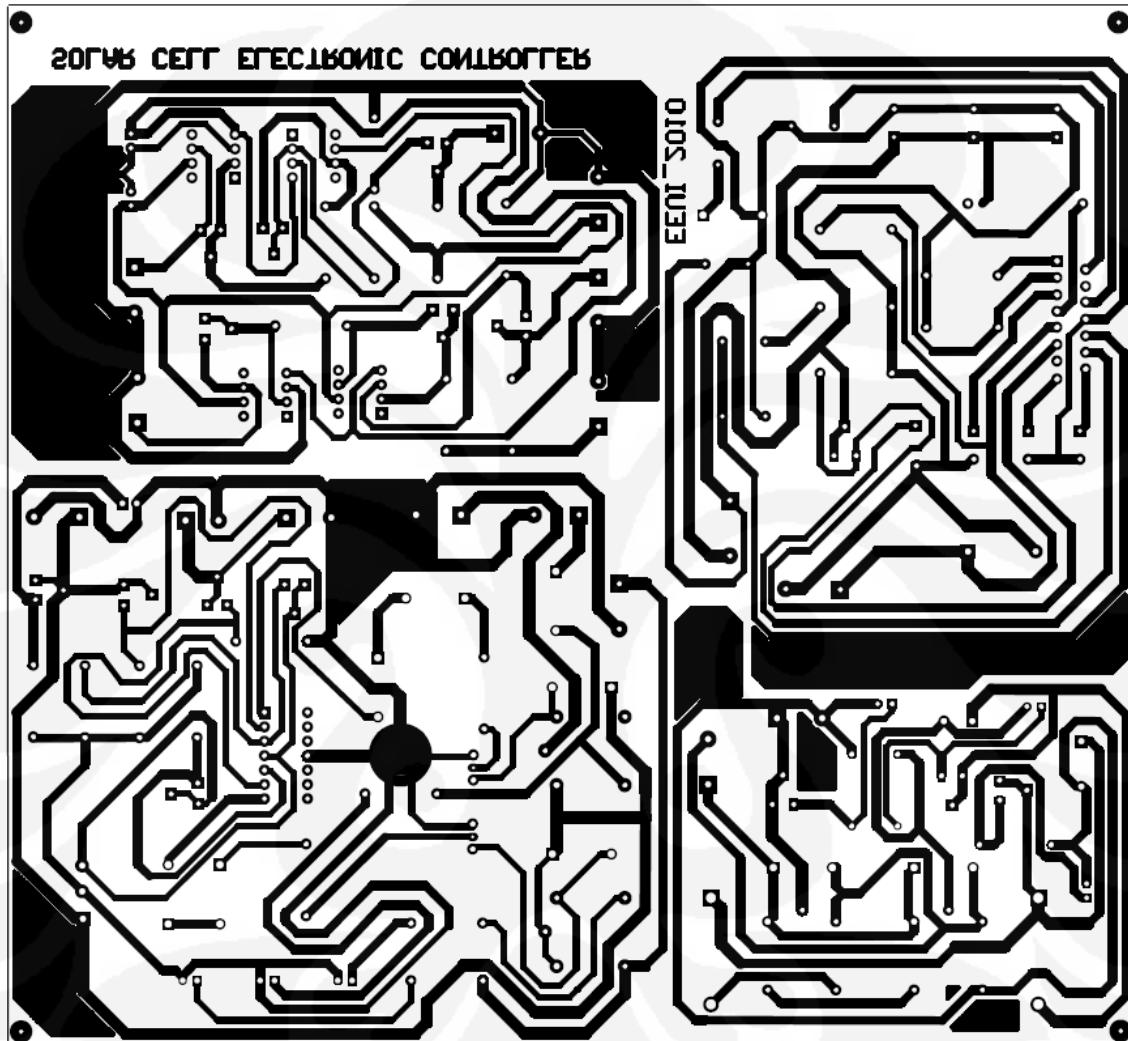
Pengujian ketika *input* sistem $\geq 20,4V$ (dari *voltage variable*), konfigurasi sistem adalah paralel yang ditandai dengan indikator LED hijau yang ON dan output nya 13V (ditunjukkan oleh kedua multimeter).

Foto 2 :

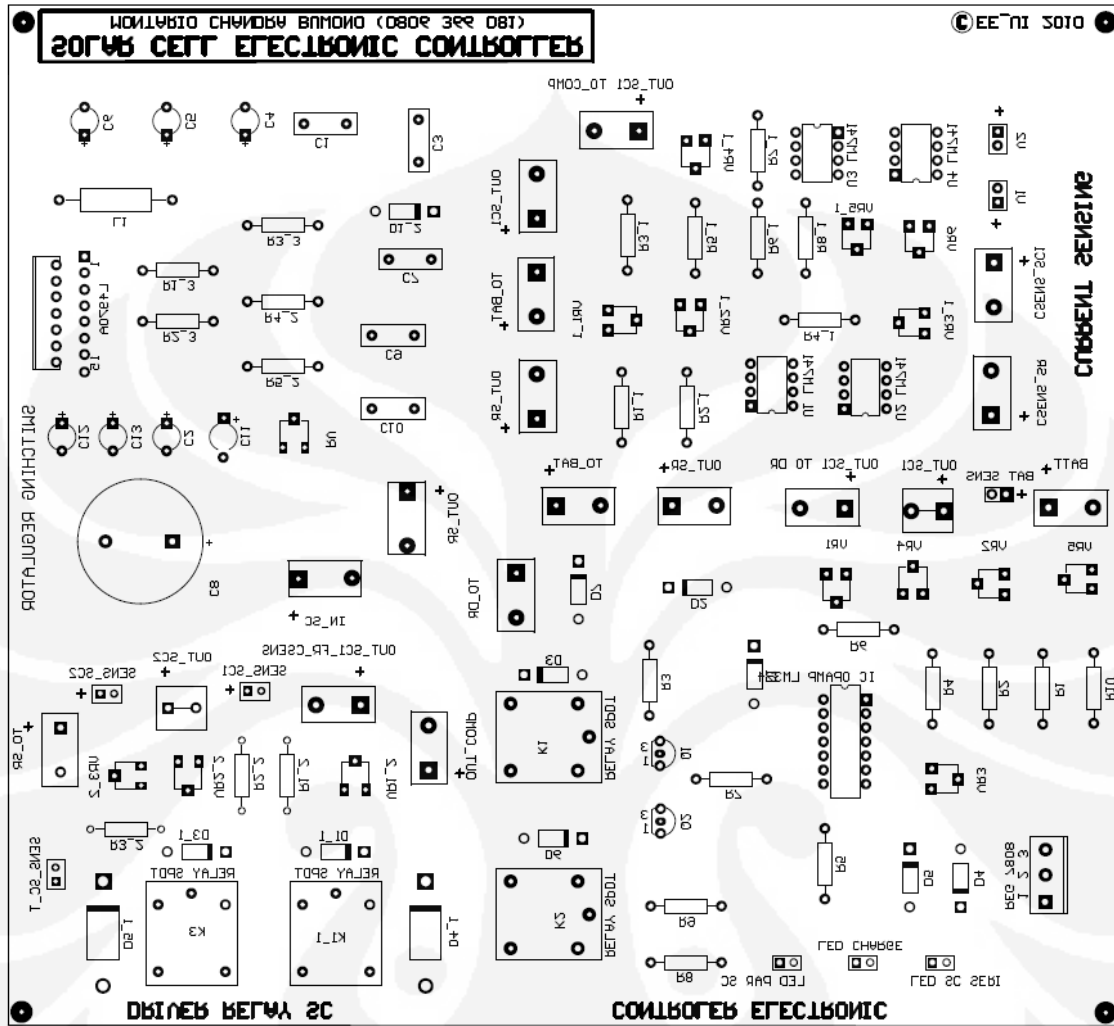
Pengujian ketika *input* sistem $\leq 20,4V$, yaitu 10,2V (dari *voltage variable*), konfigurasi sistem adalah seri yang ditandai dengan indikator LED kuning yang ON dan *output*-nya 13V (ditunjukkan oleh kedua multimeter).

LAMPIRAN 3

LAYOUT PCB

Bottom Layer

Top Layer



LAMPIRAN 4**FOTO ALAT**

