



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN RANGKAIAN PEMBATAS ARUS
UNTUK SISTEM SEL SURYA DENGAN OPSI *DUAL OUTPUT*
VOLTAGE BATERAI**

SKRIPSI

MOHAMAD TAUFIK

0706267862

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JULI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN RANGKAIAN PEMBATAS ARUS
UNTUK SISTEM SEL SURYA DENGAN OPSI *DUAL OUTPUT*
VOLTAGE BATERAI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

MOHAMAD TAUFIK

0706267862

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JULI 2011

ii

UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Mohamad Taufik

NPM : 0706267862

Tanda Tangan : 

Tanggal : 5 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Mohamad Taufik
NPM : 0706267862
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Rangkaian Pembatas Arus untuk Sistem Sel Surya dengan Opsi Dual Output Voltage Baterai

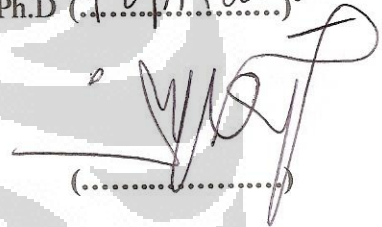
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc., Ph.D (.....)



Penguji 1 : Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, M.T. (.....)



Penguji 2 : Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo, DEA (.....)



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan untuk membatasi arus saat proses pengisian aki dengan sumber pengisian berasal dari sel surya dan juga dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menjadi Sarjana Teknik Program Studi S1 Reguler Teknik Elektro di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Purnomo Sidi Priambodo M.Sc., Ph.D., selaku dosen yang memberikan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan dalam penyusunan skripsi ini
- (2) Rekan – rekan satu bimbingan yang telah memberi masukan-masukan berharga dalam proses perancangan rangkaian pembatas arus
- (3) Para asisten laboratorium elektronika yang telah memberikan sumbangan pikiran dalam menyelesaikan skripsi
- (4) Teman-teman departemen teknik elektro yang telah membantu untuk memahami dalam penyusunan skripsi
- (5) Orang tua dan keluarga penulis yang telah memberikan bantuan material dan moral
- (6) Teman-teman yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dan penulisan skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok. Juli 2011

Penulis

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

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

Nama : Mohamad Taufik
NPM : 0706267862
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 Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**RANCANG BANGUN RANGKAIAN PEMBATAS ARUS UNTUK SISTEM
SEL SURYA DENGAN OPSI DUAL OUTPUT VOLTAGE BATERAI**

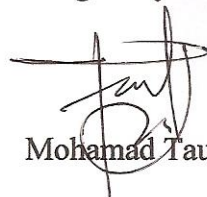
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 5 Juli 2011

Yang menyatakan



Mohamad Taufik

ABSTRAK

Nama : Mohamad Taufik
Program Studi : S1 Reguler Teknik Elektro
Judul : Rancang Bangun Rangkaian Pembatas Arus untuk Sistem Sel Surya dengan Opsi Dual Output Voltage Baterai

Skripsi ini membahas mengenai rancang bangun dari sebuah pembatas arus baterai pada sistem energi terbarukan sel surya. Kapasitas arus pengisian sel surya yang bervariasi ini akan mempengaruhi kondisi pengisian dari baterai. Baik sel surya maupun baterai memiliki nilai arus maksimum yang diizinkan agar tidak merusak komponen tersebut. Oleh karena itu, rangkaian ini didesain untuk melindungi komponen selama proses pengisian baterai. Rangkaian ini menggunakan pembatas arus 2,6 Ampere berbasis transistor dan memiliki dua output berupa aki 12 Volt dan aki 6 Volt. Relay dan komparator digunakan pada rangkaian ini untuk menentukan salah satu output yang akan terhubung dengan sel surya pada suatu kondisi pencahayaan.

Kata kunci:

Transistor, pembatas arus, komparator, relay, baterai

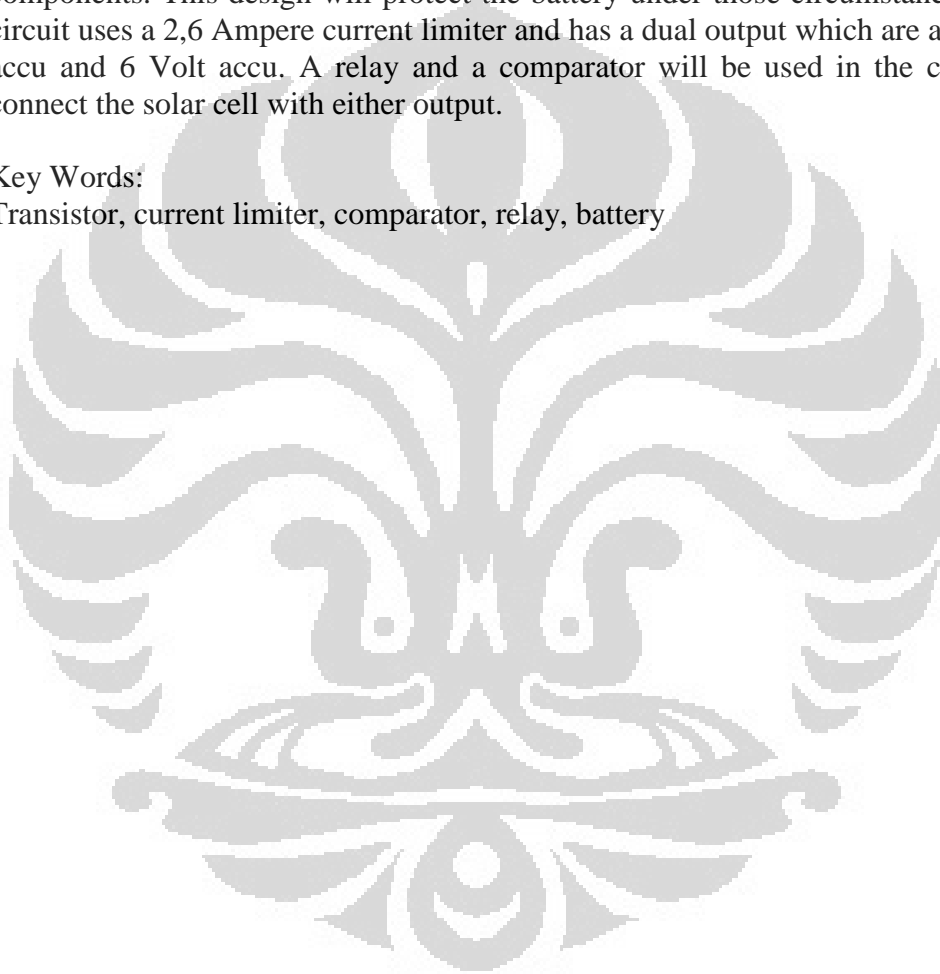
ABSTRACT

Name : Mohamad Taufik
Study Program : S1 Reguler Teknik Elektro
Title : Design and development prototype of current limiting circuit for a solar cell system with dual output voltage battery as an option

This paper focuses on the design of battery current limiter circuit in a renewable energy solar cell system. The charging current varies with the weather and may affect the condition of battery charging. The solar cell and the battery have current maximum rating which is designed in such a way so that it will not damage those components. This design will protect the battery under those circumstances. This circuit uses a 2,6 Ampere current limiter and has a dual output which are a 12 Volt accu and 6 Volt accu. A relay and a comparator will be used in the circuit to connect the solar cell with either output.

Key Words:

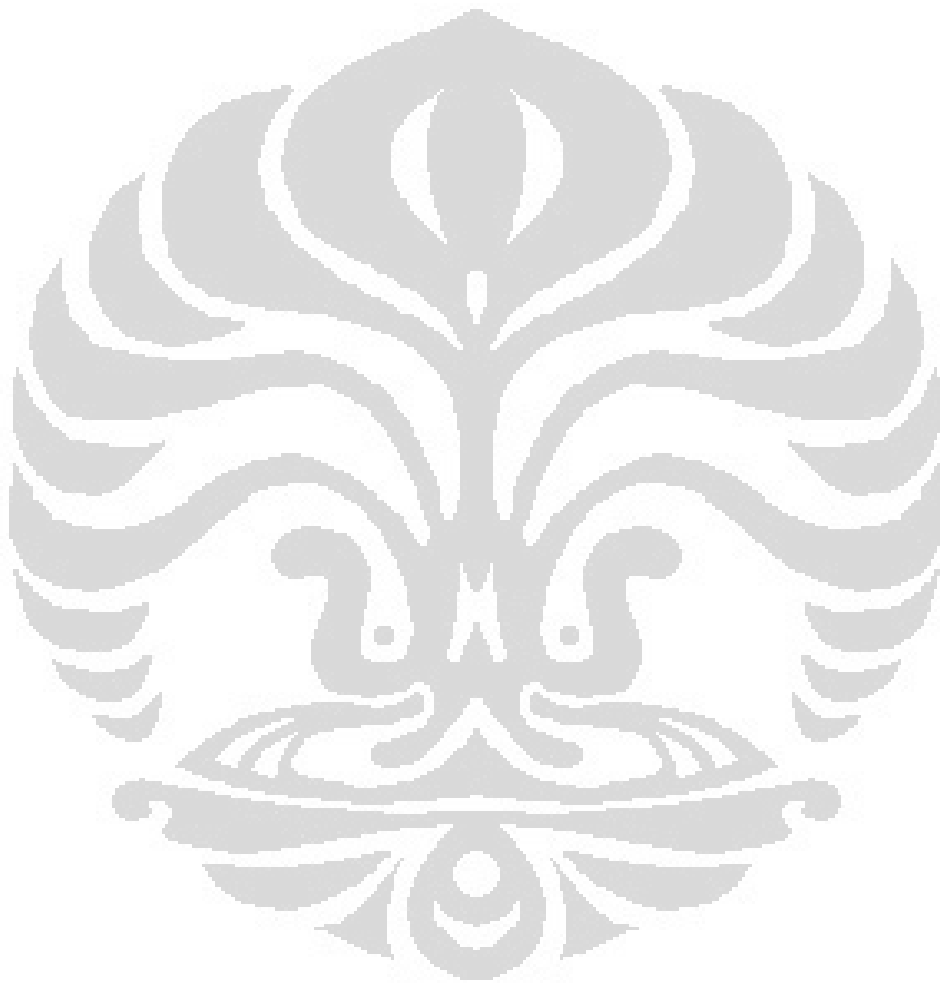
Transistor, current limiter, comparator, relay, battery



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2. DASAR TEORI	4
2.1 Sel Surya	5
2.2 Rangkaian Pembatas arus.....	6
2.3 Komparator.....	8
2.4 Relay.....	11
2.5 Transistor.....	13
2.6 Akumulator.....	15
BAB 3. SIMULASI DAN ANALISIS SIMULASI.....	18
3.1 Simulasi Rangkaian.....	18
3.1.1 Rangkaian Pembatas Arus	18
3.1.2 Relay Driver	20
3.1.3 Rangkaian Total.....	21
3.2 ANALISA SIMULASI RANGKAIAN	25
3.2.1 Pengamatan atas variasi resistansi dalam aki terhadap batas arus.....	25
3.2.2 Pengamatan atas variasi R_{sense} terhadap batas arus.....	28
3.2.3 Pengamatan atas variasi tegangan sel surya terhadap kinerja rangkaian	29
3.2.4 Pengamatan atas variasi dioda zener terhadap batas arus.....	30
3.2.5 Pengamatan atas variasi transistor terhadap batas arus	31
3.2.6 Pengamatan kinerja relay saat selama pergantian posisi on-off.....	33
BAB 4 . RANCANG BANGUN DAN ANALISIS PROTOTIPE RANGKAIAN PEMBATAS ARUS	35
4.1. Rancang Bangun Rangkaian Pembatas Arus	35
4.2. Rancang Bangun Rangkaian Total	36
4.3. Analisis Rangkaian Pembatas Arus.....	38
4.3.1 Rangkaian Pembatas Arus berbeban Aki	38
4.3.2 Rangkaian Pembatas Arus berbeban resistor.....	42
4.4. Analisis Relay	44
4.5. Analisis Pengosongan Aki	46

BAB 5. PENUTUP	49
DAFTAR REFERENSI	50
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. <i>Helicopter view</i> dari sistem rangkaian pembatas arus yang dibuat di penelitian ini.	4
Gambar 2. 2. Sel Surya sederhana	5
Gambar 2. 3. Sel surya dan panel surya	6
Gambar 2. 4. Rangkaian pembatas arus	8
Gambar 2. 5. Rangkaian komparator tegangan.....	9
Gambar 2. 6. Sinyal output komparator	10
Gambar 2. 7. Output komparator tegangan dengan selisih waktu antar kondisi... ..	11
Gambar 2. 8. Relay	13
Gambar 2. 9. Simbol transistor	13
Gambar 2. 10. Bentuk input V_{be} dan output V_{ce}	14
Gambar 2. 11. Konstruksi akumulator	16
Gambar 3. 1. Rangkaian pembatas arus untuk aki 12 Volt.....	19
Gambar 3. 2. Rangkaian pembatas arus untuk aki 6 Volt.....	19
Gambar 3. 3. Rangkaian pada blok HB1 dan HB2 pada gambar 3.1 dan 3.2.....	19
Gambar 3. 4. Komponen relay pada NI Multisim™ 11.0.....	20
Gambar 3. 5. Rangkaian total pembatas arus + relay.....	22
Gambar 3. 6. Blok HB3 pada gambar 3.5.....	22
Gambar 3. 7. Simbol untuk memodelkan sel surya	23
Gambar 3. 8. Hasil simulasi rangkaian pembatas arus.....	24
Gambar 3. 9. Grafik I_c vs resistansi beban (aki) untuk aki 12 Volt.....	26
Gambar 3. 10. Grafik I_c vs resistansi beban (aki) untuk aki 6 Volt.....	26
Gambar 3. 11. Simulasi rangkaian dengan menggunakan transistor yang memiliki nilai $h_{fe}(\min)=80$ dan $h_{fe}(\max)=800$	32
Gambar 3. 12. Simulasi rangkaian dengan menggunakan transistor yang memiliki nilai $h_{fe}(\min)=10$ dan $h_{fe}(\max)=300$	32
Gambar 3. 13. Pembagian kondisi saat relay open dan close	33
Gambar 4. 1. Prototipe rangkaian utama pembatas arus.....	35
Gambar 4. 2. Desain rangkaian total.....	36
Gambar 4. 3. Prototipe rangkaian keseluruhan	37
Gambar 4. 4. Grafik pengisian aki untuk sel surya pertama	39
Gambar 4. 5. Grafik pengisian aki untuk sel surya pertama	40
Gambar 4. 6. Pembesaran dari kotak pada gambar 4.5	40
Gambar 4. 7. Variasi resistansi dalam baterai untuk perubahan kondisi baterai .	42
Gambar 4. 8. Grafik I vs V untuk variasi resistansi beban	43
Gambar 4. 9. Grafik pengosongan aki dengan variasi resistansi beban.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Variasi tegangan yang digunakan pada simulasi	24
Tabel 3. 2. Tabel nilai I_L untuk variasi resistansi untuk simulasi aki 6 Volt.....	27
Tabel 3. 3. Tabel nilai I_L untuk variasi resistansi untuk simulasi aki 12 Volt.....	27



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Listrik berasal dari bahasa Latin baru *electricus* [1], yang berarti "seperti amber", dan berasal dari bahasa Latin klasik *electrum*, yang mana berawal dari bahasa Yunani *elektron*, yang berarti amber. Listrik dari awalnya digunakan untuk menjelaskan beragam fenomena yang terjadi akibat dari keberadaan dan aliran muatan listrik. Energi listrik ini semenjak penemuannya kini diolah dan digunakan oleh manusia dengan berbagai cara untuk memenuhi kebutuhan hidupnya.

Seiring dengan perkembangan zaman, manusia semakin menyadari kepentingan dari pemanfaatan energi listrik. Kini semakin banyak divais-divais elektronik yang menggunakan energi listrik ini. Sulit bagi manusia untuk tidak menemui hal-hal yang memanfaatkan konsep energi listrik ini di kehidupan sehari-harinya baik dari sisi pembangkitan tenaga listrik, pendistribusiannya beserta penggunaan tenaga listrik. Ide-ide baru pun kini bermunculan untuk meningkatkan efisiensi dari salah satu sektor yang telah disebutkan sebelumnya. Salah satu efisiensi yang dilakukan oleh para peneliti adalah pada sisi pembangkitan tenaga listrik.

Saat ini, muncul inovasi-inovasi baru untuk mengganti penggunaan bahan bakar fosil demi memperlambat proses pengrusakan bumi ini. Salah satu inovasi yang bertemakan "penghijauan" ini ialah dengan menggunakan sel surya sebagai sumber energi listrik alternatif sebagai alternatif pembangkit-pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang telah ada sebelumnya. Sel surya ini menggunakan cahaya matahari yang secara konsep tidak akan pernah habis selama matahari masih menyinari bumi sehingga pembangkitan energi listrik berbasis sel surya ini seringkali disebut sebagai pembangkit energi listrik yang terbarukan. Energi listrik yang dihasilkan oleh sel surya ini dapat digunakan untuk menyuplai listrik untuk berbagai aplikasi di kehidupan sehari-hari.

Kelemahan dari sel surya ini adalah dia hanya dapat menyediakan energi listrik pada saat matahari menyinari divais tersebut dengan intensitas tertentu.

Namun, saat matahari tidak dapat menyinari sel surya (misal saat hujan dengan awan yang sangat tebal atau saat malam hari), tidak akan tercipta energi listrik. Oleh karena itu, diperlukan suatu media penyimpanan yang dapat menggantikan peranan sel surya saat sel surya sedang dalam kondisi yang tidak memungkinkan untuk menyuplai energi listrik. Selama kondisi matahari sedang 'baik', selain menyuplai ke beban, sel surya juga akan mengisi baterai. Baterai ini nantinya yang akan digunakan pada saat hujan atau malam hari.

Namun, baterai ini memiliki rating arus maksimum yang mana saat nilai ini terlewati akan merusak baterai tersebut. Oleh karena itu, dibutuhkan rangkaian pembatas arus yang akan membatasi arus sehingga kerusakan baterai tidak dapat terjadi. Jadi, saat beban (baterai) menarik arus yang lebih besar, rangkaian pembatas arus ini akan membatasi arus pada level yang telah ditentukan sebelumnya.

1.2. Perumusan Masalah

Pada skripsi ini, penulis mencoba mengimplementasikan rangkaian pembatas arus yang digunakan untuk memutuskan arus pengisian dari sel surya ke baterai. Adapun detail permasalahan yang akan diteliti sebagai berikut :

1. Rancang bangun rangkaian pembatas arus
2. Pemilihan komponen elektronik yang meliputi relay, komparator, dll.
3. Simulasi rangkaian pembatas arus
4. Pembuatan prototipe rangkaian pembatas arus

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah merancang suatu rangkaian pembatas arus yang akan menghubungkan sel surya ke baterai. Sel surya ini akan digunakan untuk mengisi baterai dan untuk proteksi sel surya inilah dibangun rangkaian pembatas arus yang akan membatasi arus saat terjadi kondisi hubung singkat.

1.4. Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada skripsi ini akan dibatasi pada simulasi dan pembuatan prototipe rangkaian pembatas arus yang akan mengisi baterai dengan menggunakan sel surya sebagai pembangkit energi listrik dari cahaya matahari tanpa memperhatikan sudut optimal penerimaan cahaya oleh sel surya ataupun temperatur di sekitar sel surya pada saat pengujian.

1.5. Sistematika Penulisan

Pembahasan yang dilakukan pada penelitian ini meliputi lima bab, yaitu:

Bab 1 Pendahuluan

Bagian ini terdiri dari latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab 2 Dasar Teori

Bagian ini berisi dasar-dasar teori mengenai rangkaian pembatas arus. Dalam bab ini juga terdapat dasar teori yang mendasari penggunaan komponen-komponen yang digunakan sebagai bagian dari rangkaian ini. Dasar teori ini akan menjelaskan definisi, cara kerja ataupun karakteristik dari komponen-komponen terkait dari rangkaian dan juga menjelaskan cara kerja rangkaian itu sendiri.

Bab 3 Simulasi dan Analisis Simulasi

Bab ini berisi mengenai simulasi dari rangkaian dengan menggunakan perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Pada bab ini juga dijelaskan mengenai analisis dari rangkaian dengan memvariasikan berbagai parameter di simulasi ini.

Bab 4 Rancang Bangun dan Analisis Prototipe Rangkaian

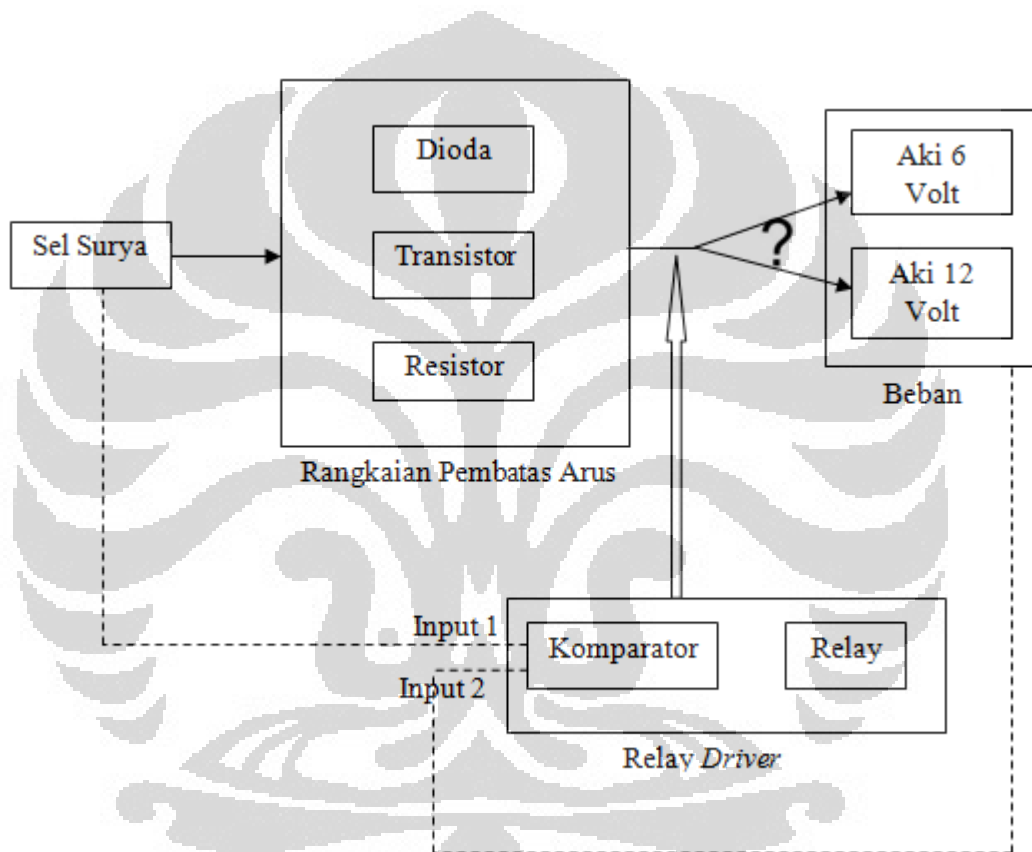
Bab ini berisi mengenai proses pembuatan rancang bangun rangkaian pembatas arus beserta analisis dari prototipe rangkaian yang telah dibuat.

Bab 5 Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari makalah skripsi ini.

BAB 2 DASAR TEORI

Bab ini akan menjelaskan mengenai dasar teori dari pembuatan rangkaian pembatas arus yang dibuat pada penelitian ini. Secara lebih lanjut akan dibahas mengenai cara kerja sistem rangkaian pembatas arus dan dasar teori komponen-komponen yang digunakan pada sistem rangkaian pembatas arus ini.

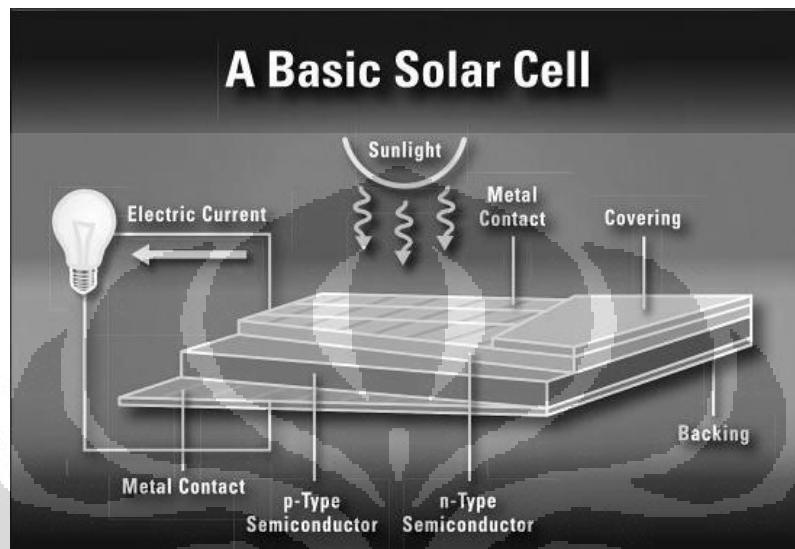


Gambar 2. 1. Helicopter view dari sistem rangkaian pembatas arus yang dibuat di penelitian ini.

Gambar 2.1 menunjukkan *helicopter view* dari sistem rangkaian pembatas arus yang dibahas pada skripsi ini. Dari gambar ini dapat dilihat beberapa blok utama dari rangkaian pembatas arus yang akan dibahas yakni blok sel surya sebagai suplai utama rangkaian, blok rangkaian pembatas arus yang akan membatasi arus yang mengalir, blok beban di *output* yang terdiri dari 2 *output*, dan juga blok relay driver yang akan menentukan output mana yang akan

terhubung dengan rangkaian pembatas arus berdasarkan input-input yang masuk ke komparator yang berasal dari sel surya dan juga beban.

2.1 Sel Surya



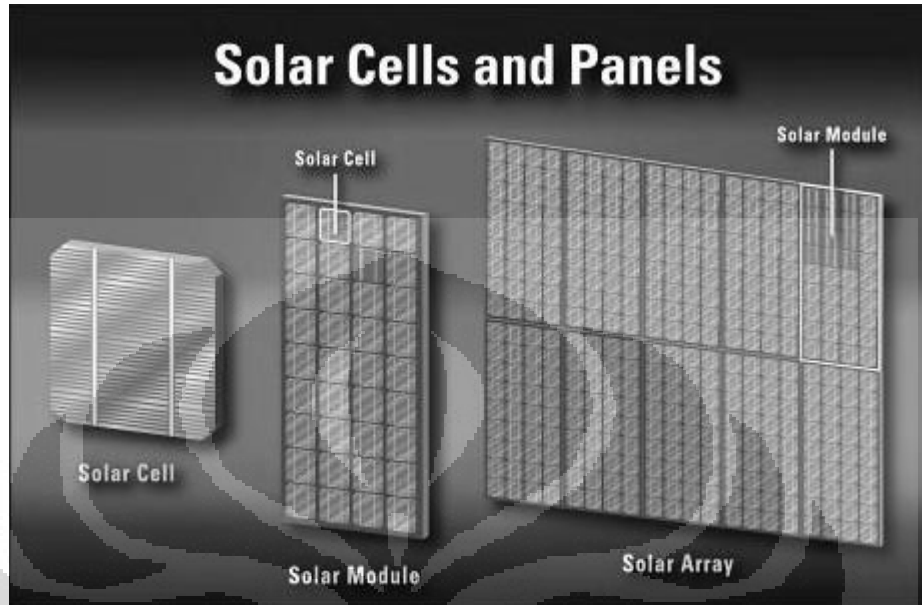
Gambar 2. 2. Sel Surya sederhana [2]

Sel surya terbuat dari sebuah tipe material yang dikenal sebagai semikonduktor. Umumnya, mereka terbuat dari silikon. Semikonduktor dapat menghantarkan atau mengalirkan arus listrik walaupun tidak sebaik metal. Itulah mengapa semikonduktor disebut “semi”. Karena mereka hanya secara “semi” menghantarkan listrik, maka semikonduktor ini dapat digunakan untuk mengendalikan arus listrik. Pada bagian atas dan bawahnya biasanya terdapat kontak metal yang mana merupakan tempat arus dapat mengalir.

Sebuah sel umum yang sederhana memiliki dua lapisan silikon. Yang pertama disebut sebagai tipe-n dan yang satunya lagi disebut sebagai tipe-p.

Proses penghasilan listrik ini dimulai saat atom silikon menyerap sejumlah cahaya. Energi dari cahaya tersebut me-”ngetuk” sejumlah elektron keluar dari atom. Elektron-elektron ini mengalir di antara dua lapisan. Aliran inilah yang akhirnya menghasilkan arus listrik. Arus ini dapat meninggalkan sel melalui kontak metal dan dapat dimanfaatkan untuk hal-hal lain. Saat cahaya mengenai sel surya, banyak dari energinya yang terbuang. Beberapa cahaya memantul atau

menembus sel dan beberapa diubah menjadi energi panas. Hanya cahaya dengan panjang gelombang yang tepat, atau warna, yang diserap dan kemudian diubah menjadi energi listrik.



Gambar 2. 3. Sel surya dan panel surya [2]

Sebuah sel surya yang sederhana hanya akan menghasilkan sedikit energi listrik. Untuk kebanyakan keperluan, diperlukan energi listrik yang lebih besar. Oleh karena itu, sel ini sering dihubungkan bersama dalam suatu kumpulan sel yang disebut dengan *solar modules*. Sebuah *solar module* memiliki frame yang dapat menampung sel-sel. Beberapa modul dapat memiliki panjang dan lebar hingga beberapa kaki. Mereka biasanya dapat menghasilkan energi listrik hingga ratusan Watt. Jika dibutuhkan daya yang lebih, maka *modules* dapat digabung lagi untuk membentuk sebuah array surya yang besar. [2]

2.2 Rangkaian Pembatas arus

Rangkaian pembatas arus seringkali disalah artikan sebagai *current / circuit breaker*. Tidak seperti saklar yang akan memutuskan rangkaian, sebuah rangkaian pembatas arus hanya akan membatasi nilai arus pada suatu level yang ditentukan sebelumnya. Rangkaian pembatas arus bisa saja terdiri dari 1 resistor saja, tapi di sini penulis akan menjelaskan mengenai rangkaian pembatas arus

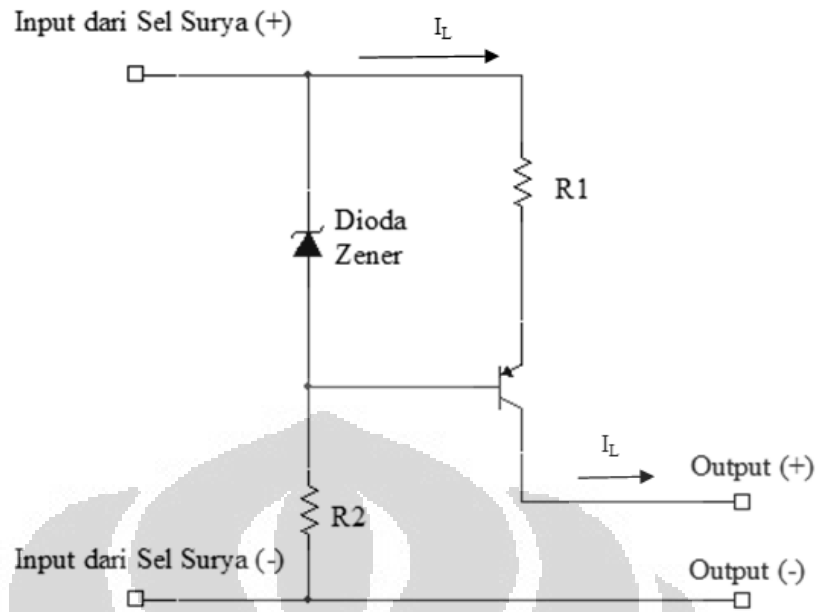
yang bersifat aktif (*active current limiting circuit*). Dengan sebuah resistor (pembatas arus yang bersifat pasif), tegangan jatuh akan bervariasi tergantung dari arus yang dikonsumsi oleh beban. Semakin tinggi arus yang melewati beban, maka akan semakin tinggi tegangan jatuh pada resistor tersebut. Namun, pada banyak kasus, ini bukanlah hal yang diinginkan. Kasus serius dari kelebihan arus akibat hubung singkat juga dapat menyebabkan hilangnya stabilitas dari tegangan beban ataupun dapat menyebabkan kehancuran seluruh sistem. [3]

Pada rangkaian aktif ini, rangkaian pembatas arus akan mencoba tidak menjatuhkan nilai tegangan saat arus yang melewati beban berada di batas yang diizinkan. Dengan mekanisme ini, pada kondisi normalnya, rangkaian pembatas ini akan mencoba untuk tidak mendisipasi daya sehingga hampir seluruh daya akan terkirim ke beban. Jika beban menarik arus dengan nilai lebih dari yang diizinkan, maka rangkaian pembatas arus kini akan bertindak sebagai resistor, dan akan mengendalikan nilai resistansinya ke batas arus yang ditentukan.[4]

Tanpa pembatas arus, maka sumber tegangan pada gambar 2.4 akan tersambung secara langsung ke beban R. Beban R di sini biasanya berupa sesuatu yang menarik beragam nilai arus (seperti *variable resistor*), dan dapat berupa baterai yang ingin diisi ataupun rangkaian *amplifier*. Namun, dalam bahasan ini kita akan menganggap R *load* nya adalah aki yang nantinya akan kita isi.

Rangkaian ini akan membatasi arus *output* maksimum dari suplai daya yang kita gunakan. Dengan menggunakan batasan atas dari arus yang akan mengalir dari suplai daya yang digunakan, maka rangkaian pembatas arus ini akan melindungi baik suplai daya maupun rangkaian yang tersambung dengan suplai daya tersebut. Terlebih lagi, rangkaian ini merupakan rangkaian yang cukup sederhana dan hemat biaya.

Rangkaian dasar pertama dapat dilihat dari gambar 2.4. Dioda zener yang terdapat pada rangkaian tersebut akan menetapkan tegangan maksimum yang memungkinkan untuk bagian *emitter* dari transistor yang akan digunakan. Rangkaian pembatas arus yang digunakan pada penelitian ini akan menggunakan dua rangkaian dasar pada gambar 2.4 yang mana keluaran dari keduanya akan dihubungkan yang menjadi nilai arus maksimum dari rangkaian pembatas arus.



Gambar 2. 4. Rangkaian pembatas arus [5]

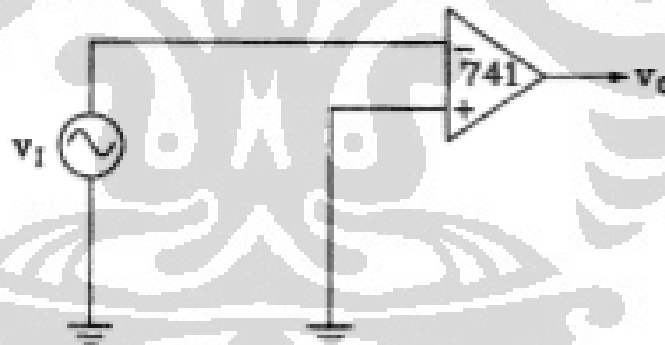
Tegangan di R1 akan merupakan pengurangan tegangan zener dengan tegangan V_{BE} dari transistor. Jadi, saat zener sudah bekerja, tegangan jatuh di R1 akan bernilai tetap. Dengan demikian, nilai arus di R1 bisa diperoleh dengan cara membagi nilai tegangan jatuh di R1 dengan besar resistansi R1 sehingga nilai arus yang melewati R1 akan terbatas di nilai tersebut. Langkah selanjutnya ialah menentukan berapa nilai arus yang ingin ditetapkan level arus maksimum. Jika ditetapkan bahwa nilai arus maksimum yang ingin digunakan adalah sebesar 2,6 Ampere, maka saat beban ingin menarik arus lebih dari nilai yang telah ditetapkan tersebut, berapapun besarnya nilai arus tersebut (kondisi terburuk ialah saat terjadi gangguan hubung singkat), maka rangkaian pembatas arus ini akan membatasi nilai arusnya menjadi 2,6 Ampere. Namun, karena 2,6 Ampere merupakan total dari dua rangkaian pembatas arus, berarti masing-masing rangkaian pembatas arus akan membatasi arus hingga 1,3 Ampere.

2.3 Komparator

Sebuah rangkaian komparator tegangan akan membandingkan dua nilai tegangan dan menghasilkan suatu output. Outputnya akan selalu bernilai antara

salah satu dari dua nilai (sebagai contoh outputnya adalah digital). Misalkan, kita mempunyai dua nilai tegangan yang kita beri nama A dan B. Rangkaian dapat didesain sehingga jika input A lebih positif daripada input B, maka outputnya akan bernilai $+V_{sat}$. Jika hal sebaliknya yang terjadi dimana input A kurang positif jika dibandingkan dengan input B, outputnya akan bernilai $-V_{sat}$. Pada umumnya, rangkaian komparator tegangan akan menggunakan dua nilai tegangan sebagai input dan akan menghasilkan satu dari dua output tegangan tertentu tergantung dari nilai-nilai relatif dari kedua input tersebut.

Rangkaian komparator tegangan umum digunakan sebagai aplikasi-aplikasi analog-to-digital converter (ADC) dan berbagai macam rangkaian alarm. Pada aplikasi alarm, salah satu input yang masuk ke komparator dikendalikan oleh sinyal yang dimonitor. Input keduanya dihubungkan ke tegangan referensi yang mewakili suatu nilai yang ditentukan. Jika nilai yang dimonitor tadi melewati batasan nilai referensi, di mana nilai referensi tersebut ditentukan sebagai nilai batas aman, maka outputnya akan berganti keadaan dan alarm akan berbunyi.

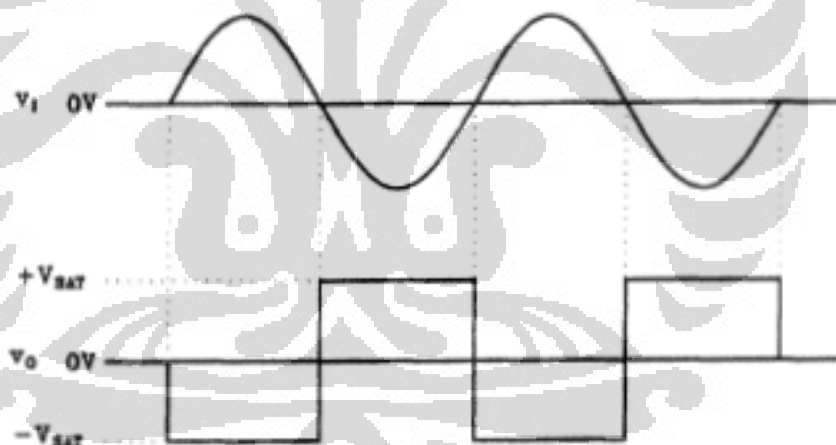


Gambar 2. 5. Rangkaian komparator tegangan

Gambar berikut menunjukkan rangkaian skematik dari sebuah komparator tegangan dengan kutub inverting yang digunakan sebagai sebuah *zero-crossing detector*. Yang dimaksud demikian adalah output dari komparator berganti (switch) keadaan setiap saat nilai input melewati tegangan yang bernilai 0.

Salah satu cara untuk melihat operasi dari rangkaian di atas adalah dengan menganggapnya sebagai sebuah open-loop amplifier yang mana tidak terdapat feedback sehingga gain dari amplifier ini hanya akan merupakan open-loop gain dari op-amp itu sendiri. Karena nilai gain ini sangatlah besar, maka kita kan tahu bahwa outputnya akan bernilai $+V_{sat}$ ataupun $-V_{sat}$ jika nilai tegangan input berada diatas bahkan sekitar 1 mikroVolt atau berada di atasnya lagi ataupun berada di bawah potensial dari ground.

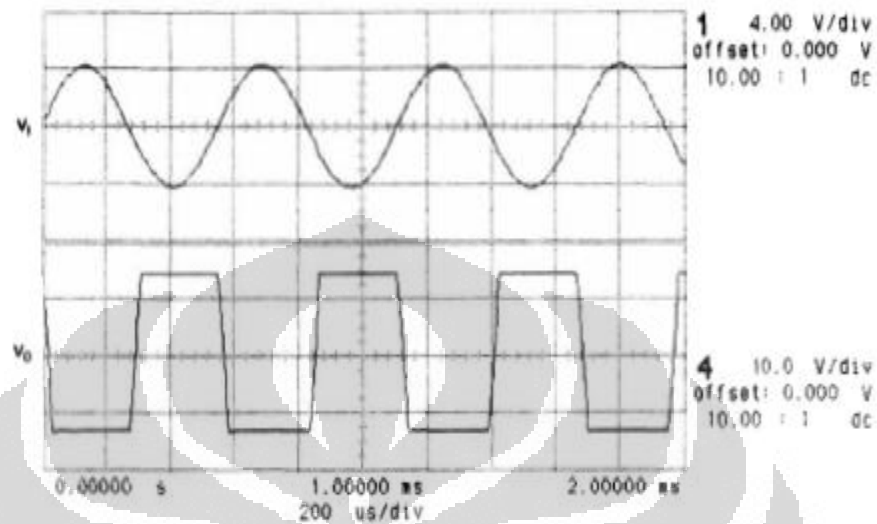
Karena tegangan output ada pada salah satu dari dua level saturasi untuk setiap waktunya, maka rangkaian ini mengkonversi sebuah inputan gelombang sinus menjadi sebuah gelombang persegi (square). Gelombang outputnya akan memiliki frekuensi yang sama dengan input namun memiliki amplitudo yang akan terus berganti pada $\pm V_{sat}$ terlepas dari berapapun nilai dari tegangan input. Gambar berikut menunjukkan hubungan antara gelombang input dan gelombang output:



Gambar 2. 6. Sinyal output komparator

Seperti telah disebutkan sebelumnya, output dari komparator tegangan akan berganti antara dua nilai tegangan ($\pm V_{sat}$). Pada op-amp sebenarnya, akan dibutuhkan sedikit waktu untuk perpindahan nilai output antara $+V_{sat}$ dan $-V_{sat}$. Rate maksimum dimana output dapat berganti kondisi disebut slew rate dari suatu op-amp dan dispesifikasikan pada data sheet. Jika frekuensi input terlalu tinggi

(perubahan kondisi terjadi terlalu cepat), maka output dari op-amp tidak dapat secara cepat mengimbangi perubahan nilai input.



Gambar 2. 7. Output komparator tegangan dengan selisih waktu antar kondisi

2.4 Relay

Relay adalah sebuah *switch* elektromekanik. Relay digunakan di hampir semua divais elektronik untuk men-*switch* tegangan atau sinyal elektronik. Switch elektromekanik yang paling mudah ditemukan adalah switch pada dinding rumah yang digunakan untuk mengontrol lampu-lampu di rumah. Perbedaannya dengan tipe ini adalah *switch* ini membutuhkan seorang manusia untuk melakukan proses *switching* antara kondisi hidup dan mati. Relay beroperasi dengan cara yang berbeda. Relay tidak membutuhkan interaksi manusia untuk melakukan proses *switching*. Pada faktanya, pulsa elektronikalah yang sebenarnya melaksanakannya. Relay adalah sebuah divais yang sangat bermanfaat dan mereka biasa digunakan di hampir seluruh industry: *automobile*, sistem telepon, divais medis, dan sistem stereo pada mobil. [8]

Sebuah relay beroperasi dengan berbasis pada prinsip elektromagnetik. Di dalam relay terdapat sebuah induktor, yang mana saat diberikan sebuah pulsa listrik akan menghasilkan medan magnet. Bagian relay lainnya adalah sistem dari

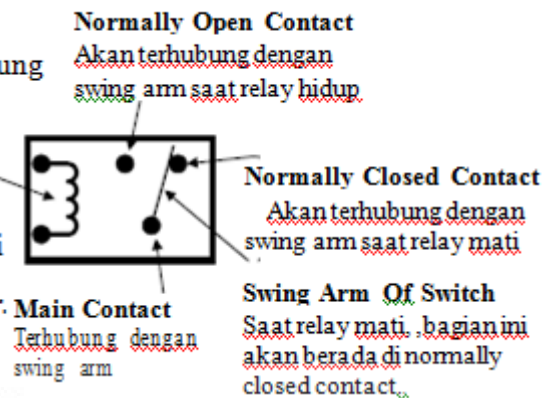
‘tangan’ metal yang merupakan kontak fisik dari switch tersebut. Saat relay mati, atau tidak ada pulsa listrik yang diberikan ke relay, maka ‘tangan’ dari switch (*switching arm*) tersebut ada pada salah satu kontak dari switch. Namun, saat relay hidup, atau saat relay diberikan pulsa listrik, maka *switching arm* tersebut akan bergerak ke kontak lain dari switch. *Switching arm* tersebut akan bergerak saat medan magnet yang dihasilkan menarik *switching arm* ke arah induktor. Ada beberapa konfigurasi relay yang berbeda namun ini adalah bentuk paling sederhana dari *internal switching*. Relay dapat memiliki 1 atau lebih *switching arm* pada sebuah box relay.[8]

Ada beberapa istilah yang digunakan pada relay:

- Inductor Coil:*** Menghasilkan medan magnet di dalam relay saat diterapkan suatu nilai tegangan.
- Swing Arm:*** Satu-satunya bagian yang bergerak pada relay. Bagian ini akan bergantian bergerak antar kontak saat proses *switching* terjadi (saat medan magnet yang dihasilkan oleh induktor menarik bagian ini)
- Normally Open Contact:*** Salah satu kontak yang tidak terhubung dengan *swing arm* saat relay dalam kondisi mati tapi akan terhubung dengan *swing arm* saat relay aktif.
- Normally Close Contact:*** Kebalikan dari *normally open contact* dimana kontak ini akan terhubung dengan *swing arm* saat relay mati, dan sebaliknya.
- Main Contact:*** Terhubung dengan *swing arm*. Tujuan utama proses “*switching*” dari relay adalah untuk memungkinkan terjadinya pergantian hubungan antara rangkaian utama dengan *normally close contact* dan *normally open contact* saat relay hidup atau mati. connected to the *swing arm*.

Inductor (wire coil)

Satu kontak akan terhubung ke ground dan satunya lagi akan terhubung ke kawat yang akan bernilai positif (+) saat di-*trigger*.

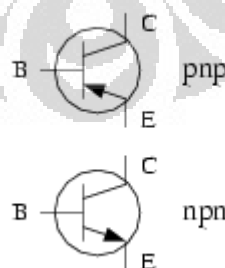


Gambar 2. 8. Relay [8]

Saat relay ada di kondisi mati, swing arm akan terhubung dengan *normally closed contact*. Ini berarti saat relay mati, *normally closed contact* akan terhubung dengan kontak utama. Saat relay aktif, maka medan magnet yang diciptakan oleh induktor akan menarik swing arm hingga bagian tersebut akan terhubung dengan *normally open contact* sehingga rangkaian pada kontak utama akan terhubung dengan *normally open contact*. [8]

2.5 Transistor

Komponen transistor terbuat dari bahan semikonduktor dengan *pn junction* dan tampak seperti gambar berikut:



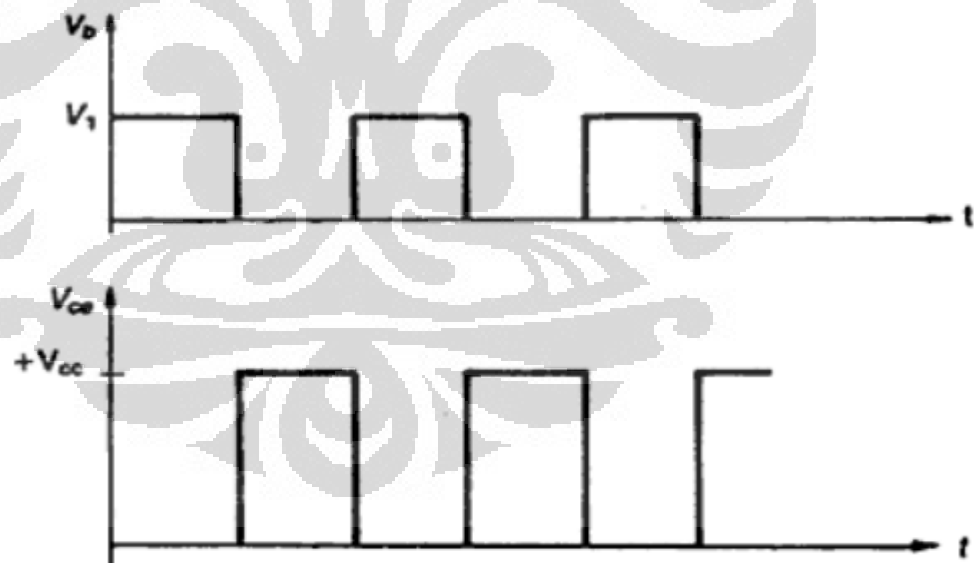
Gambar 2. 9. Simbol transistor [9]

Pada umumnya, pemakaian komponen transistor pada rangkaian elektronika dibagi menjadi dua klasifikasi [10], yaitu:

1. Sebagai *switching* transistor
2. Sebagai penguat (*amplifier*)

Sebagai *switching* transistor, daerah kerja transistor adalah di daerah saturasi dan daerah *cut-off*. Sedangkan sebagai penguat, transistor akan bekerja di daerah seperti titik Q (bukan daerah *cut-off* dan juga bukan daerah saturasi) untuk jenis penguat sinyal kecil (*small signal amplifier*). Tetapi untuk jenis penguat daya besar (*power amplifier*), transistor didesain di daerah *cut-off* dan saturasi. Pemberian titik kerja Q disebut juga dengan pemberian tegangan bias pada bagian basis dari suatu transistor.

Agar transistor bekerja di daerah jenuh dan daerah *cut-off*, maka dapat dilakukan dengan mengatur tegangan V_b dan menentukan tahanan R_b , dan juga tahanan beban R_L . Untuk mendapatkan *on-off* yang bergantian dengan periode tertentu, maka dapat dilakukan dengan memberikan tegangan V_b yang berupa pulsa seperti gambar 2.10.



Gambar 2. 10. Bentuk input V_{be} dan output V_{ce} [10].

Apabila $V_b = 0$, maka transistor *off* (*cut-off*). Apabila $V_b = V_1$, dan dengan mengatur R_b dan R_L sedemikian rupa, sehingga menghasilkan arus I_b yang akan

menyebabkan transistor dalam keadaan jenuh, dalam keadaan seperti ini, V_{ce} kira-kira sama dengan 0 ($V_{sat}=0,2$ Volt).

Bentuk output V_{ce} yang terjadi (gambar 2.10) apabila dijelaskan adalah sebagai berikut:

1. Pada kondisi $V_b = 0$, harga $I_c = 0$, dan berdasarkan persamaan loop:

$$V_{cc} + I_c R_1 - V_{ce} = 0, \text{ maka}$$

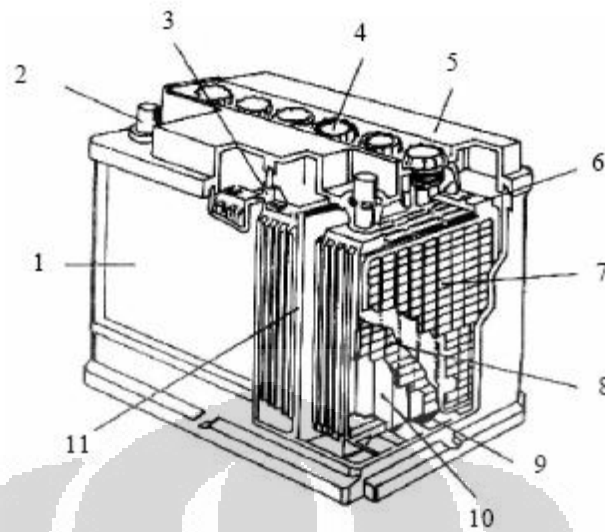
$$V_{ce} = V_{cc} \quad (1)$$

2. Pada kondisi $V_b = V_1$, harga $V_{ce} = 0$ dan $I_c = I$ saturasi (I_{sat}) [10].

2.6 Akumulator

Akumulator adalah sebuah alat yang dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia[11]. Contoh-contoh akumulator adalah baterai dan kapasitor. Pada umumnya di Indonesia, kata akumulator (sebagai aki atau accu) diartikan sebagai "baterai" mobil. Sedangkan dalam bahasa Inggris, kata akumulator dapat mengacu kepada baterai, kapasitor, dll. Akumulator termasuk ke dalam jenis sel sekunder, artinya sel ini dapat dimuati ulang ketika muatannya habis. Ini karena reaksi kimia dalam sel dapat dibalikkan arahnya. Sewaktu sel diberikan muatan, energi listrik diubah menjadi energi kimia, dan sewaktu sel bekerja, energi kimia diubah menjadi energi listrik.

Akumulator merupakan elemen sekunder yang merupakan elemen elektrokimia yang dapat memperbaharui bahan-bahan pereaksinya. Jenis akumulator yang sering dipakai adalah akumulator timbal. Akumulator ini terdiri dari dua kumpulan pelat yang dicelupkan dalam larutan asam-sulfat encer. Kedua kumpulan pelat dibuat dari timbal, sedangkan lapisan timbal dioksida akan dibentuk pada pelat positif ketika elemen pertama kali dimuati. Letak pelat positif dan negatif sangat berdekatan tetapi dicegah tidak langsung menyentuh oleh pemisah yang terbuat dari bahan penyekat (isolator). Adapun konstruksinya ditunjukkan oleh Gambar 2.11.



Gambar 2. 11. Konstruksi akumulator[12]

Bagian-bagian akumulator timah hitam dan fungsinya sebagai

berikut :

1. Rangka, berfungsi sebagai rumah akumulator.
2. Kepala kutub positif, berfungsi sebagai terminal kutub positif.
3. Penghubung sel, berfungsi untuk menghubungkan sel-sel.
4. Tutup Ventilasi, berfungsi menutup lubang sel.
5. Penutup, berfungsi untuk menutup bagian atas akumulator.
6. Plat-plat, berfungsi sebagai bidang pereaktor.
7. Plat negatif, terbuat dari Pb, berfungsi sebagai bahan aktif akumulator.
8. Plat positif, terbuat dari PbO_2 , berfungsi sebagai bahan aktif akumulator.
9. Ruang sedimen, berfungsi untuk menampung kotoran.
10. Plastik pemisah, berfungsi untuk memisahkan plat positif dan negatif.
11. Sel-sel.

Saat akumulator digunakan sebagai suplai ke beban, maka akumulator akan mengalami proses pengosongan, sehingga akumulator tersebut harus diisi lagi dengan dialiri arus listrik DC yang besarnya tertentu. Proses ini disebut pengisian akumulator. [12].



BAB 3

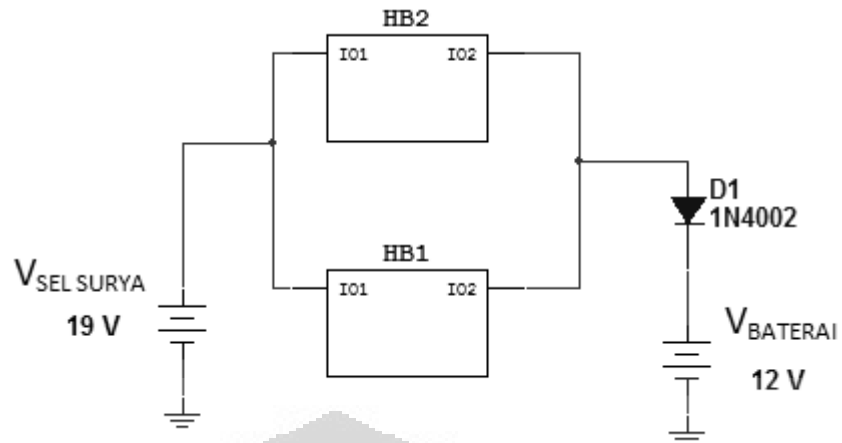
SIMULASI DAN ANALISIS SIMULASI

3.1 Simulasi Rangkaian

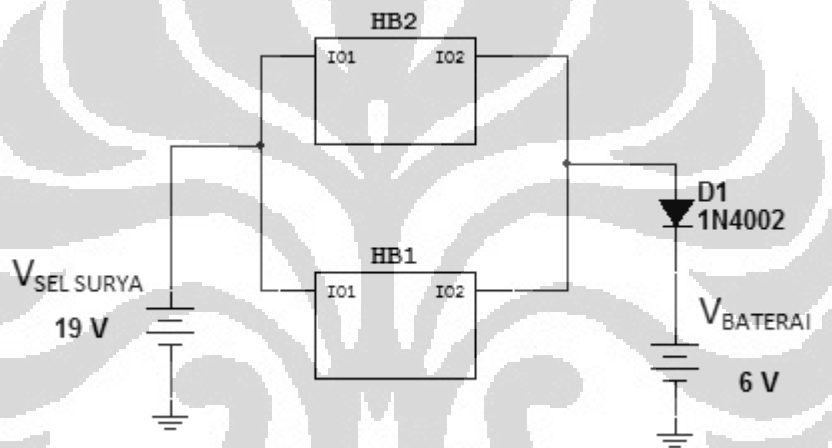
3.1.1 Rangkaian Pembatas Arus

Rangkaian pembatas arus (lihat gambar 3.1) disimulasikan oleh penulis dengan menggunakan perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Rangkaian pembatas arus yang disimulasikan pada software tersebut ditampilkan pada gambar 3.1 dan 3.2. Gambar 3.1 menampilkan rangkaian pembatas arus dengan *output* aki 12 Volt sementara pada gambar 3.2 menampilkan rangkaian pembatas arus dengan *output* aki 6 Volt. Gambar 3.3 menunjukkan rangkaian dalam blok HB1 dan HB2 yang terdapat pada gambar 3.1 dan 3.2.

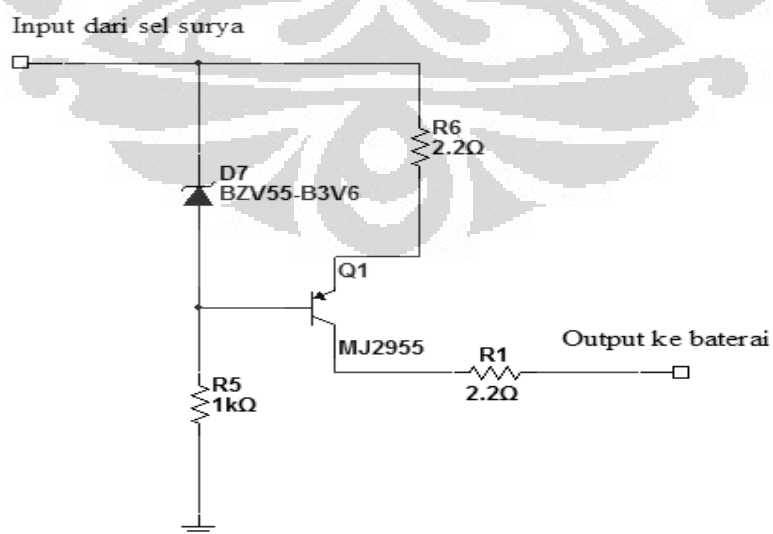
Gambar 3.1 dan 3.2 disimulasikan di NI Multisim™ 11.0. Untuk melihat kinerja dari rangkaian pembatas arus ini, maka pertama-tama akan dilihat nilai arus yang tercatat saat parameter hambatan beban (*load*) divariasikan sementara nilai tegangan sel surya dijaga tetap. Nilai hambatan dalam aki memiliki kisaran besaran di skala mOhm [13]. Oleh karena itu, pada simulasi kali ini akan diambil data perubahan hambatan dalam aki dari 1-5000 mOhm. Rangkaian ini menghasilkan I_{load} dalam kisaran 2,14 – 2,58 Ampere untuk $V_{sel_surya}=19$ Volt. Saat beban bernilai besar (1 Ohm), arus yang melewati beban bernilai 2,14 Ampere sementara saat beban bernilai kecil (1 mOhm), arus yang melewati beban bernilai 2,58 Ampere. Nilai resistansi beban yang kecil menunjukkan bahwa beban berupaya menarik arus yang lebih besar lagi (arus kolektor yang ingin ditarik lebih besar lagi). Saat ini terjadi, arus emitter akan berupaya mengikuti kenaikan arus yang disebabkan penurunan nilai resistansi beban. Namun, karena tegangan jatuh di resistor emitter dijaga tetap di 2,9 Volt dan besar resistansi emitter juga tetap, maka arus di emitter juga akan bernilai tetap. Jadi, saat mencoba menarik arus lebih, rangkaian pembatas arus ini akan menjaga arus maksimum yang mengalir di rangkaian agar berada di nilai arus maksimum yang telah ditetapkan sebelumnya.



Gambar 3. 1. Rangkaian pembatas arus untuk aki 12 Volt



Gambar 3. 2. Rangkaian pembatas arus untuk aki 6 Volt



Gambar 3. 3. Rangkaian pada blok HB1 dan HB2 pada gambar 3.1 dan 3.2.

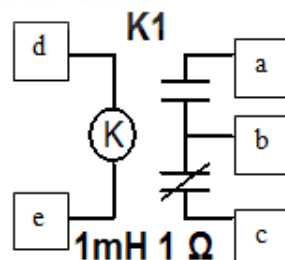
Rangkaian ini dapat sedikit dikembangkan lagi dengan cara mengganti dioda zener dengan LED. Saat tegangan jatuhnya turun, maka LED akan redup atau mati sepenuhnya. Matinya LED ini akan menunjukkan bahwa beban yang ada pada bagian output sudah berlebihan.

Rangkaian pembatas arus yang digunakan ada 2, yakni yang satu adalah untuk pembatasan arus dalam rangka pengisian aki 12 Volt dan yang satunya lagi adalah untuk pembatasan arus dalam rangka pengisian aki 6 Volt. Rangkaian dan besar komponen lain yang digunakan tetap sama hanya saja rangkaian kedua memiliki nilai tegangan aki yang berbeda.

3.1.2 Relay Driver

Pada rangkaian total (Gambar 3.5) terdapat komponen relay. Relay ini akan memutuskan rangkaian saat tegangan sumber melebihi tegangan referensi. Penulis memasukkan rangkaian ini dengan maksud sebagai *switch* untuk menentukan *output* yang akan terhubung ke rangkaian pembatas arus dimana kondisi hidup matinya ditentukan oleh komparator. Gambar komponen relay di software NI Multisim™ 11.0 ditampilkan pada gambar 3.4.

Pada relay driver ini terdapat komponen komparator. Komponen komparator yang digunakan ialah LM393. Komponen ini akan membandingkan besar tegangan pada kedua terminal inputannya. Nilai tegangan yang dibandingkan ialah nilai tegangan dari sel surya dan juga tegangan aki. Terminal *input non-inverting*nya terhubung dengan tegangan sel surya yang sudah melalui proses *voltage divider* sementara terminal *input inverting*nya dihubungkan dengan tegangan dari baterai 12 Volt.

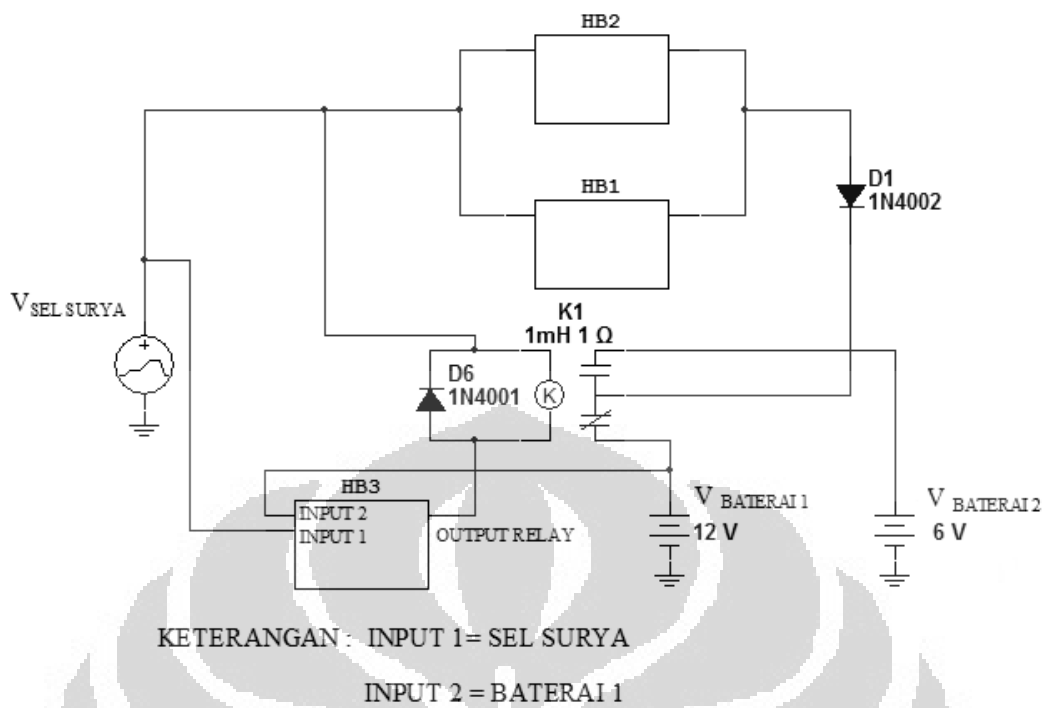


Gambar 3. 4. Komponen relay pada NI Multisim™ 11.0

Relay ini adalah *combination relay* akan tetapi pada simulasi ini dapat kita anggap sebagai *normally-closed relay*. Secara garis besar, pada kondisi normal relay ini mengubungkan rangkaian yang terhubung pada terminal b (Lihat gambar 3.4) dengan rangkaian yang terhubung pada terminal c. Namun, saat tegangan dari sel surya melampaui nilai tegangan yang ditentukan (dalam hal ini 14 Volt), maka relay ini akan memutuskan hubungan antara terminal b dan terminal c dan akan menghubungkan terminal b dengan terminal a. Namun, kalau terminal a tidak dihubungkan ke rangkaian apapun, maka saat ini terjadi relay hanya akan memutuskan hubungan antara terminal b dan c.

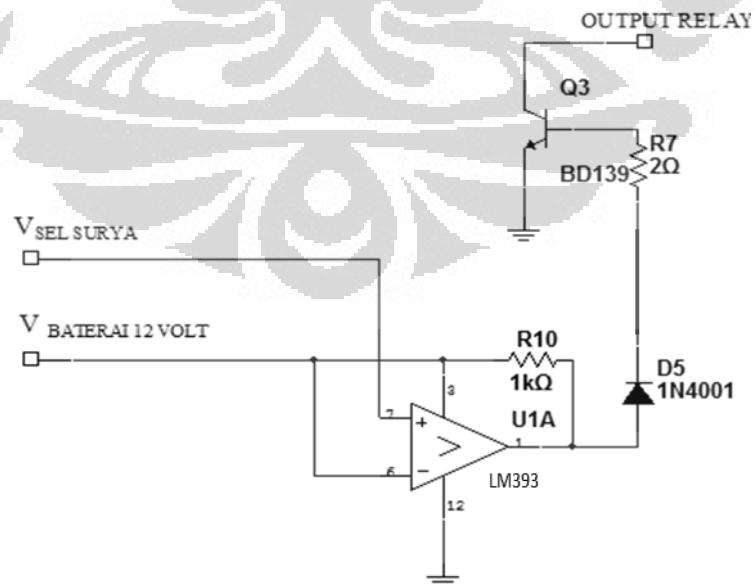
Pada relay driver ini juga terdapat transistor dan dioda. Saat tegangan pada terminal input non-inverting lebih kecil daripada tegangan pada terminal input inverting, maka output dari komparator bernilai high. Saat tegangan pada terminal input non-inverting lebih dari tegangan pada terminal input inverting, maka output dari komparator bernilai low. Dioda yang diparalelkan dengan relay pada terminal d dan e (Lihat gambar 3.4.) berguna sebagai proteksi untuk relay[14]. Dioda merupakan sambungan P dan N yang memungkinkan arus melewati hanya satu arah jika terminal sumber positif dihubungkan dengan anoda dan akan menghalangi arus pada arah yang lain jika terminal sumber negatif dihubungkan pada anoda, sehingga dari sifat ini dioda dapat difungsikan sebagai proteksi atau perlindungan rangkaian dari arus balik yang akan masuk pada sebuah rangkaian elektronik yang memungkinkan menyebabkan kerusakan, salah satunya sebagai proteksi pada rangkaian yang menggunakan relay. Relay merupakan sebuah rangkaian induktif yang dapat mengeluarkan arus induksi saat proses *switching on-off* nya. Oleh karena itu, dengan memasang dioda secara berlawanan antara arus dengan kutub katoda maka akan menghalangi arus induksi dari relay ke rangkaian lainnya.

3.1.3 Rangkaian Total



Gambar 3. 5. Rangkaian total pembatas arus + relay

Rangkaian dalam blok HB1 dan HB2 dapat dilihat lagi di gambar 3.3, sementara rangkaian dalam blok HB3 yang terdapat pada gambar 3.5 adalah sebagai berikut:

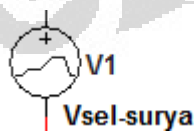


Gambar 3. 6. Blok HB3 pada gambar 3.5

Gambar 3.5 menunjukkan keseluruhan rangkaian. Gambar 3.6 menampilkan blok HB3 yang tertera pada gambar 3.5. Pada blok HB3 ini terdapat komparator LM393 yang berguna untuk membandingkan input tegangan di kedua terminalnya. Saat $V_{\text{sel surya}} > V_{\text{baterai}}$, maka tidak akan ada output yang menyebabkan relay pada kondisi awal (*normally closed*) dan akan menyebabkan sel surya terhubung dengan aki 12 Volt. Namun, saat $V_{\text{sel surya}} < V_{\text{baterai}}$, maka akan ada output yang menyebabkan relay bekerja hingga menjadi *open* dan akan menyebabkan sel surya terhubung dengan aki 6 Volt.

Rangkaian total dijalankan pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Sebelumnya telah dibuat grafik yang menunjukkan karakteristik batas arus dari rangkaian pembatas arus ini tanpa relay saat divariasikannya nilai resistansi dalam aki sementara tegangan sel surya dijaga tetap. Kali ini, penulis ingin menampilkan karakteristik batas arus dari rangkaian pembatas arus ini dengan relay. Parameter yang dijaga tetap kali ini adalah resistansi dalam aki sementara parameter yang divariasikan adalah tegangan dari sel surya.

Rangkaian total disimulasikan pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Simulasi ini didasarkan pada fakta bahwa kondisi sinar matahari yang relatif tidak stabil. Sumber tegangan akan sangat bergantung dari kondisi cuaca hari dimana pengambilan data dilakukan bahkan untuk kondisi cuaca yang sama namun karena adanya awan yang menghalangi cahaya matahari akan mempengaruhi proses pengambilan data. Karena pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. tidak tersedia simbol untuk sel surya, maka simbol sumber sel surya dimisalkan sebagai gambar 3.7 yang juga terdapat di gambar rangkaian total



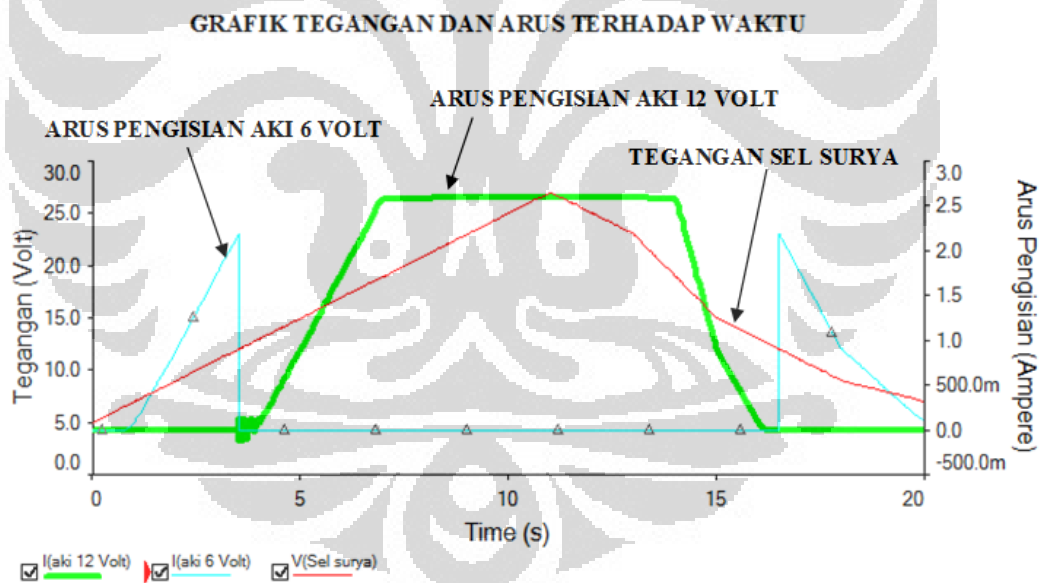
Gambar 3. 7. Simbol untuk memodelkan sel surya

Simbol ini terdapat pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0 untuk memisalkan sumber tegangan yang nilai dan perubahan nilai (relatif terhadap waktu) nya dapat kita atur sesuka hati atau disebut *piecewise linear voltage source*

pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Untuk simulasi ini, nilai tegangan sel surya kita variasikan sesuai tabel 3.1

t (sekon)	V (Volt)	t (sekon)	V (Volt)
0	5	11	27
1	7	12	25
2	9	13	23
3	11	14	19
4	13	15	15
5	15	16	13
6	17	17	11
7	19	18	9
8	21	19	8
9	23	20	7
10	25		

Tabel 3. 1. Variasi tegangan yang digunakan pada simulasi



Gambar 3. 8. Hasil simulasi rangkaian pembatas arus

Dengan menggunakan data dari tabel 3.1 sebagai data sumber tegangan, maka didapatkan grafik yang ditampilkan pada gambar 3.8 yang menunjukkan hasil simulasi dari rangkaian total yang sebelumnya telah dijelaskan.

Garis yang ditunjukkan oleh tanda panah tegangan sel surya menunjukkan tegangan sel surya yang divariasikan sesuai tabel 3.1. Garis yang ditunjukkan dengan tanda panah arus pengisian aki 6 Volt menunjukkan arus yang melewati aki 6 Volt dan garis satu lagi menunjukkan arus yang melewati aki 12 Volt.

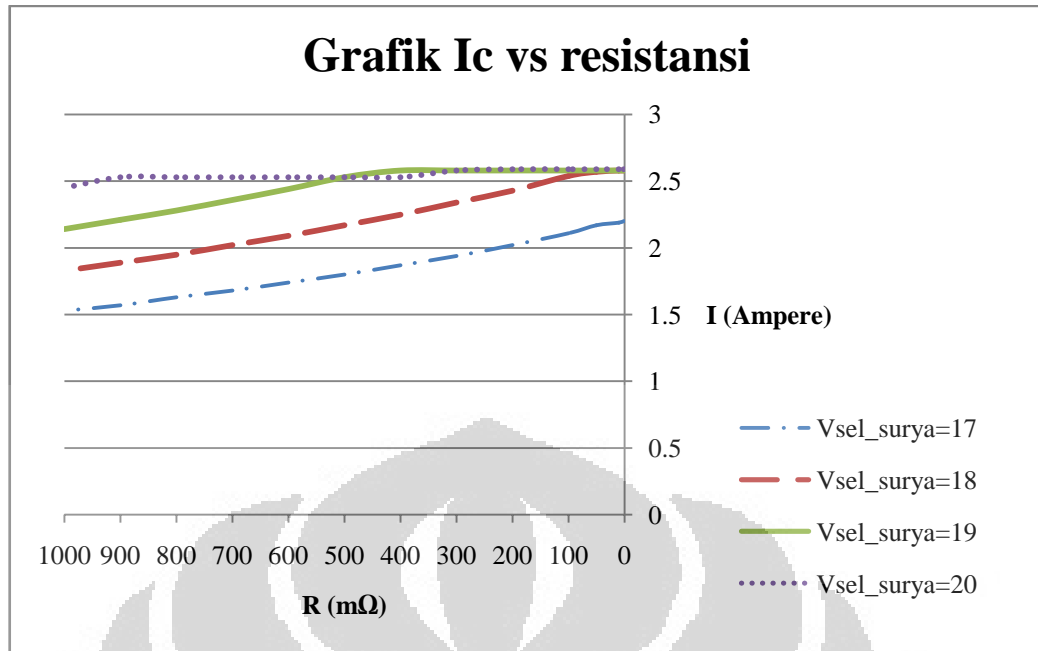
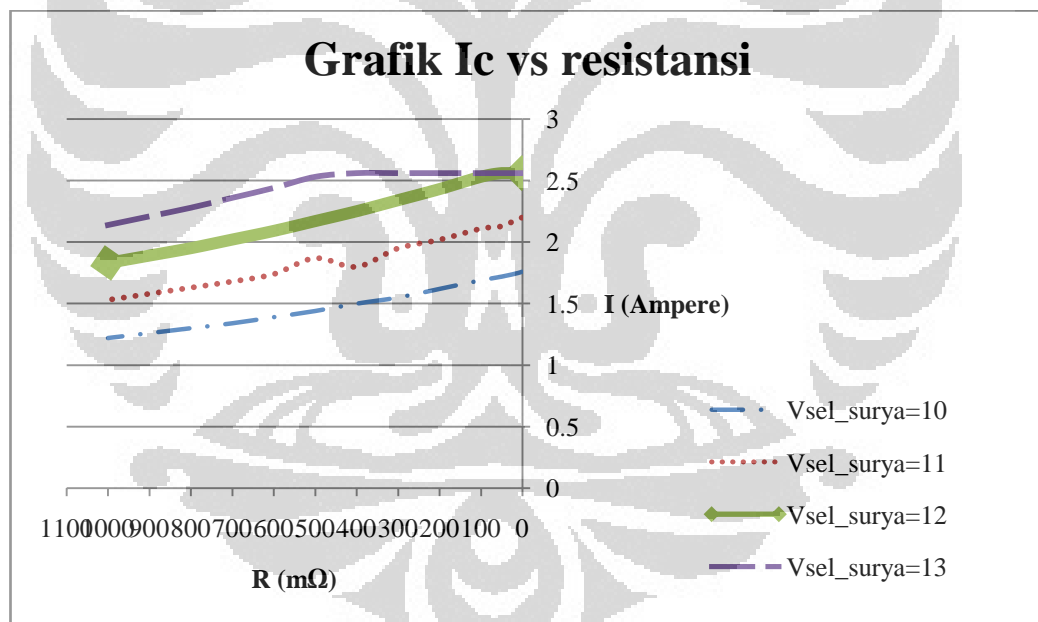
Saat tegangan sel surya masih belum mencapai nilai yang ditentukan ($V_{\text{sel surya}} < 14$ Volt), maka relay bekerja dan menghubungkan sel surya ke aki 6 Volt. Dapat dilihat bahwa pada garis arus pengisian aki 12 Volt, garis tersebut meningkat hingga nilai tertentu dimana dia menjadi konstan. Ini merupakan kinerja dari rangkaian pembatas arus dari sel surya ini. Saat tegangan sel surya sudah lebih dari nilai yang ditentukan ($V_{\text{sel surya}} > 12$ Volt), maka relay bekerja dan menghubungkan sel surya ke aki 12 Volt. Seiring dengan kenaikan $V_{\text{sel surya}}$, arus yang melewati aki seharusnya juga ikut meningkat, akan tetapi berkat adanya rangkaian pembatas arus ini, batas arus maksimal dijaga di nilai yang diinginkan yakni di nilai sekitar 2,1 Ampere untuk aki 6 Volt dan 2,6 Ampere untuk aki 12 Volt.

3.2 ANALISA SIMULASI RANGKAIAN

Sebelumnya telah dijelaskan mengenai rangkaian total pembatas arus. Pada bab ini, penulis akan menganalisa hasil simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0. Yang akan penulis simulasikan pada bab ini akan menghasilkan grafik karakteristik perubahan arus I_C terhadap perubahan resistansi dalam aki dan grafik karakteristik perubahan arus I_C terhadap perubahan tegangan sel surya. Selain kedua karakteristik ini, penulis juga akan mengamati hal-hal lainnya dengan cara membuat komponen dioda, transistor, dan relay sebagai variabel sementara menjaga variabel lainnya tetap.

3.2.1 Pengamatan atas variasi resistansi dalam aki terhadap batas arus

Sebelumnya telah digambarkan rangkaian pembatas arus untuk aki 6 Volt dan aki 12 Volt. Jika rangkaian tersebut disimulasikan, maka akan didapatkan grafik I_C vs resistansi dalam untuk aki 6 Volt dan 12 Volt. Gambar ini menunjukkan karakteristik arus I_C (arus yang mengalir ke aki) saat resistansi dalam aki divariasikan. Gambar 3.9 dan 3.10 dibuat dengan menggunakan Microsoft Office Excel 2007 berdasarkan tabel 3.2 dan tabel 3.3.

Gambar 3. 9. Grafik I_c vs resistansi beban (aki) untuk aki 12 VoltGambar 3. 10. Grafik I_c vs resistansi beban (aki) untuk aki 6 Volt

Resistansi (mOhm)	I_L			
	V=9	V=10	V=11	V=12
1	1,76	2,2	2,56	2,56
10	1,75	2,19	2,56	2,56
50	1,72	2,13	2,56	2,56

100	1,69	2,11	2,53	2,56
200	1,62	2,02	2,43	2,56
300	1,55	1,95	2,34	2,56
400	1,5	1,8	2,25	2,56
500	1,44	1,87	2,17	2,53
600	1,39	1,74	2,09	2,44
700	1,34	1,68	2,02	2,36
800	1,3	1,63	1,95	2,28
900	1,26	1,58	1,89	2,21
1000	1,22	1,53	1,83	2,14

Tabel 3. 2. Tabel nilai I_L untuk variasi resistansi untuk simulasi aki 6 Volt

Resistansi (mOhm)	I_L			
	V=17	V=18	V=19	V=20
1	2,2	2,58	2,58	2,59
10	2,19	2,58	2,58	2,59
50	2,17	2,57	2,58	2,59
100	2,11	2,54	2,58	2,59
200	2,02	2,43	2,58	2,59
300	1,94	2,34	2,58	2,58
400	1,87	2,25	2,58	2,53
500	1,8	2,17	2,53	2,53
600	1,74	2,09	2,44	2,53
700	1,68	2,02	2,36	2,53
800	1,63	1,95	2,28	2,53
900	1,57	1,89	2,21	2,53
1000	1,53	1,83	2,14	2,45

Tabel 3. 3. Tabel nilai I_L untuk variasi resistansi untuk simulasi aki 12 Volt

Gambar 3.9 menunjukkan grafik antara arus beban berbanding dengan resistansi beban selama proses pengisian aki 12 Volt ($V_{aki}=12$ Volt) sementara gambar 3.10 menunjukkan grafik antara arus beban berbanding dengan resistansi beban untuk selama proses pengisian aki 6 Volt ($V_{aki}=6$ Volt). Kurva tersebut juga menunjukkan variasi nilai tegangan sumber (V_s). Dari kurva tersebut, terlihat bahwa perubahan tegangan sumber akan mengakibatkan perubahan arus beban, dimana nilainya berbanding lurus. Saat V_s meningkat, maka terlihat bahwa arus beban akan meningkat pula. Namun, karena kenaikan dari arus beban tersebut tidak terlalu besar maka untuk kasus ini rangkaian pembatas arus masih mampu

menangani arus maksimum ini sehingga tidak merusak komponen-komponen rangkaian seperti transistor maupun baterai yang digunakan.

3.2.2 Pengamatan atas variasi R_{limit} terhadap batas arus

R_{sense} yang dimaksud adalah resistor yang berada pada bagian emitter (R_6) dari gambar 3.3. Kombinasi R_{limit} dan dioda zener lah yang akan menentukan nilai arus yang menjadi batas maksimal pada rangkaian ini. Pemilihan besar R_{limit} harus ditetapkan berdasarkan arus maksimal atau disipasi daya yang dapat ditampung oleh resistor tersebut. Daya yang dimiliki resistor tersebut harus melebihi disipasi daya yang terjadi di resistor saat rangkaian ini bekerja. Pada perangkat lunak NI Multisim™ 11.0, daya resistor tidak dapat ditentukan nilainya sehingga berapapun disipasi daya yang terjadi pada resistor R_{limit} , resistor tidak akan rusak dan simulasi masih dapat tetap berjalan. Akan tetapi, pada kenyataannya pemilihan komponen resistor harus memperhatikan dayanya.

$$V_{\text{zener}} - V_{\text{di}} R_{\text{limit}} - V_{\text{be}} = 0 \quad (2)$$

Sementara nilai $V_{\text{di}} R_{\text{limit}}$ adalah:

$$V_{\text{di}} R_{\text{limit}} = \text{batas arus maksimum} \times \text{resistansi } R_{\text{limit}}$$

dan V_{be} transistor darlington $\approx 0,7$, R_{sense} yang dipakai 2,2 Ohm dan V_{zener} yang dipakai 3,6 Volt maka dari persamaan (2) didapat,

$$3,6 - R_{\text{limit}} - 0,7 = 0$$

$$V_{\text{di}} R_{\text{limit}} = 2,9 \quad (3)$$

$$I \times R_{\text{limit}} = 2,9$$

$$I = \frac{2,9}{2,2} \approx 1,32 \text{ Ampere} \quad (4)$$

Untuk menentukan disipasi dayanya, digunakan rumus:

$$P = R_{\text{sense}} \times (I)^2 \quad [15]$$

$$P = 2,2 \times (1,32)^2$$

$$P = 3,8 \text{ Watt}$$

Untuk mengatasi kerusakan resistor R_{limit} pada rangkaian ini, maka dibutuhkan resistor dengan daya yang lebih besar dari disipasi daya yang terjadi. Pada percobaan ini, penulis menggunakan resistor 2,2 Ohm 5 Watt untuk mencegah agar resistor tidak rusak.

Dari grafik pada gambar 3.9 dan 3.10 didapatkan bahwa perubahan resistansi dalam aki akan mempengaruhi karakteristik arus I_C . Hal ini karena nilai resistansi yang besar menunjukkan penarikan arus yang lebih kecil dari beban jika dibandingkan dengan nilai resistansi yang kecil dimana beban mencoba menarik arus yang lebih besar. Grafik pada gambar 3.9 dan 3.10 memiliki karakteristik arus I_C yang mirip dimana pada keduanya terlihat bahwa seiring dengan penurunan nilai resistansi dalam aki, arus I_C yang mencoba ditarik lebih besar dan saat inilah rangkaian pembatas arus ini bekerja dimana rangkaian ini membatasi arus sehingga didapat garis lurus horizontal yang menandakan arus terjaga di nilai arus $\approx 2,6$ Ampere. Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa seiring dengan kenaikan tegangan, garis batas arus horizontal terlihat lebih cepat. Hal ini karena saat tegangan dinaikkan arusnya pun ikut meningkat. Saat arus yang melewati rangkaian meningkat, dioda zener lebih cepat mulai bekerja karena arus minimum untuk dioda zener bekerja sudah dilewati akibat kenaikan arus ini. Hal inilah yang membuat kerja batas arus terlihat lebih awal. Garis batas arus horizontal ini terlihat di baik rangkaian pembatas arus 6 Volt maupun 12 Volt yang menandakan rangkaian ini bekerja dengan benar untuk kedua besaran tegangan aki tersebut.

3.2.3 Pengamatan atas variasi tegangan sel surya terhadap kinerja rangkaian

Pada gambar 3.8 telah didapatkan grafik pengaruh perubahan tegangan sel surya terhadap karakteristik arus I_C untuk kedua aki. Simulasi ini dilakukan dengan cara menjaga variabel resistansi dalam aki tetap sementara sumber sel surya besarnya divariasikan. Saat tegangan naik, arus yang melewati rangkaian pun meningkat. Saat tegangan masih rendah, arus yang melewati dioda zener masih belum mencukupi untuk menghidupkan komponen tersebut sehingga karakteristik batas arus juga masih belum terlihat. Namun, saat tegangannya

dinaikkan, arus yang melewati zener sudah cukup besar hingga dioda zener dapat mulai bekerja dan membuat tegangan di R_{sense} menjadi konstan dan hal ini akan membuat arus terbatas di nilai V di R_{sense} dibagi dengan resistansi R_{sense} . Saat tegangan dinaikkan lebih lanjut lagi, yang menandakan arus yang mengalir seharusnya lebih besar, transistor akan mendisipasi daya lebih besar lagi. Oleh karena itu, dibutuhkan transistor dengan tegangan kolektor emiter maksimum yang tinggi dan memiliki *rating* disipasi daya maksimum yang besar. Semakin besar perbedaan antara tegangan input dan output, maka akan semakin besar pula tegangan jatuh di rangkaian pembatas arus yang nantinya akan didisipasi pada resistor dan transistor

Hal lain yang perlu diamati adalah untuk mengisi aki dengan nilai tegangan tertentu, tegangan pengisian sumber harus lebih besar dari tegangan aki tersebut. Untuk mengisi aki 6 Volt maka dibutuhkan sumber tegangan lebih dari 6 Volt + tegangan jatuh rangkaian pembatas arus sedangkan untuk mengisi aki 12 Volt dibutuhkan sumber tegangan lebih dari 12 Volt + tegangan jatuh rangkaian pembatas arus. Oleh karena itu, pada simulasi ini penulis mengambil data sumber tegangan sel surya dari 11 Volt hingga 13,9 Volt untuk pengisian aki 6 Volt sedangkan untuk aki 12 Volt diambil data dengan sumber tegangan sel surya dari 17 Volt hingga 20 Volt.

3.2.4 Pengamatan atas variasi dioda zener terhadap batas arus

Pada rangkaian ini, dioda zener digunakan sebagai pemberi nilai tegangan yang konstan. Besar tegangan V_Z yang dipilih akan mempengaruhi besar arus yang menjadi batas maksimal dari rangkaian ini. Hubungan antara V_Z dengan I_C dapat dilihat dari persamaan (2):

$$V_{zener} - V \text{ di } R_{limit} - V_{be} = 0 \quad (2)$$

$$V_{zener} = V \text{ di } R_{limit} + V_{be}$$

dimana $V \text{ di } R_{sense} = I \times R_{limit}$ dan $V_{be} = 0,7$ Volt. Maka didapat

$$V_{zener} = I \times R_{limit} + 0,7$$

Dari persamaan tersebut, dapat terlihat dengan jelas bahwa V_{zener} berbanding lurus dengan I (arus batas yang diinginkan). Semakin besar nilai

V_{zener} , maka akan semakin besar pula batas arusnya dan semakin kecil nilai V_{zener} , maka akan semakin kecil pula batas arusnya.

3.2.5 Pengamatan atas variasi transistor terhadap batas arus

Fungsi transistor pada rangkaian ini adalah sebagai pengatur batas arus dari rangkaian. Transistor ini akan bekerja sebagai pendisipasi daya saat tegangan jatuh di rangkaian bernilai besar dan juga sebagai pemberi nilai tegangan basis emiter untuk mendapatkan perhitungan batas arus maksimum yang tepat. Saat beban mencoba menarik arus lebih, tegangan jatuh di resistor R_{limit} meningkat dan tegangan basis menurun. Hal ini akan menurunkan arus basis yang kemudian akan menurunkan arus I_E dan I_C . Jadi, nilai arus I_E dan I_C ditentukan pula oleh nilai I_B . Hubungan antara I_B dengan I_C dan I_E adalah:

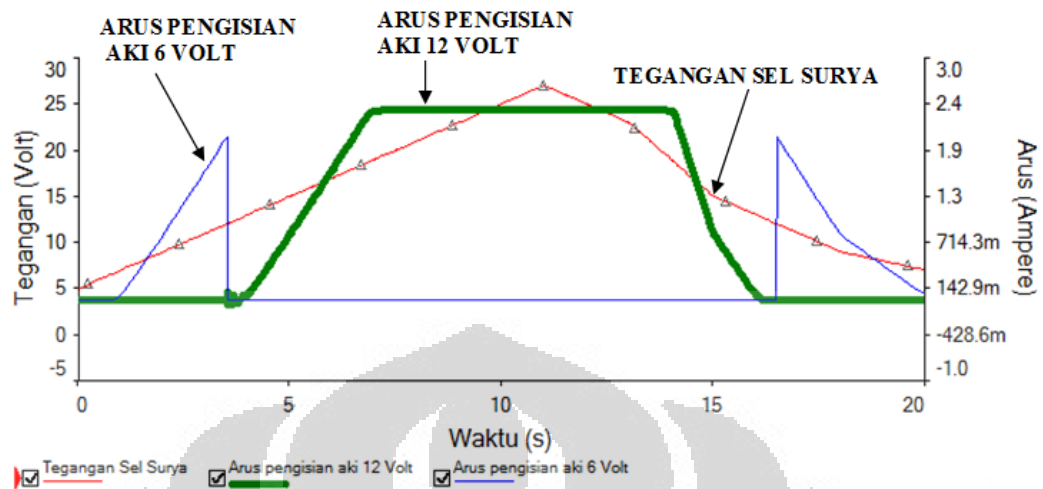
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \text{ dan } I_E = I_B + I_C \quad [16] \quad (5)$$

Variabel β merupakan d.c. *current gain* yang dimiliki oleh transistor. Setiap transistor memiliki karakteristik β yang berbeda-beda tergantung tujuan awal penggunaan transistor dan juga proses fabrikasinya sendiri. Bahkan, *datasheet* untuk satu tipe transistor namun berbeda perusahaan pembuatnya akan terdapat beberapa perbedaan dalam *datasheet* tersebut. Oleh karena itu, pemilihan komponen transistor haruslah berdasarkan kebutuhan dari rangkaian dan spesifikasi yang tertera di *datasheet*. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan di *datasheet* transistor seperti rating maksimum untuk I_C , disipasi daya maksimum, tegangan V_{CE} , dll.

Pada simulasi di perangkat lunak NI Multisim™ 11.0, transistor tidak akan rusak walaupun arus yang melewati kolektor lebih dari rating maksimum I_C yang tertera pada *datasheet*. Oleh karena itu, yang dapat dilihat adalah pengaruh β pada karakteristik arus I_C dan I_E yang tercipta. Untuk melihat pengaruh β , maka variabel-variabel lain dijaga tetap. Penulis menggunakan kembali gambar 3.8 sebagai acuan dasar simulasi ini.

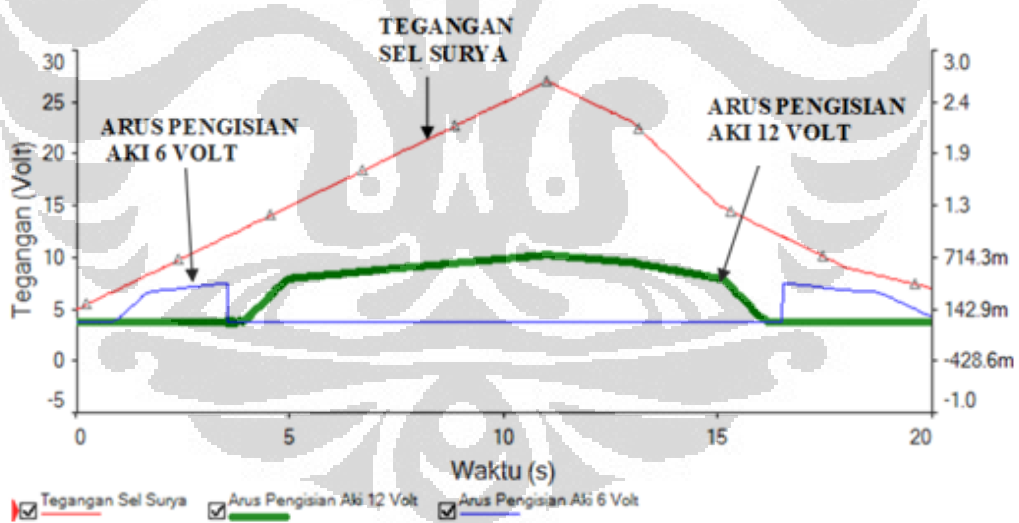
Sementara gambar 3.11 dan gambar 3.12 adalah gambar simulasi yang didapat saat digunakan 2 tipe transistor PNP dengan gain yang berbeda dimana transistor pertama memiliki $h_{fe}(\min)=80$ dan $h_{fe}(\max)=800$ dan transistor kedua memiliki $h_{fe}(\min)=10$ dan $h_{fe}(\max)=100$.

GRAFIK TEGANGAN DAN ARUS TERHADAP WAKTU



Gambar 3. 11. Simulasi rangkaian dengan menggunakan transistor yang memiliki nilai $h_{fe}(\min)=80$ dan $h_{fe}(\max)=800$

GRAFIK TEGANGAN DAN ARUS TERHADAP WAKTU

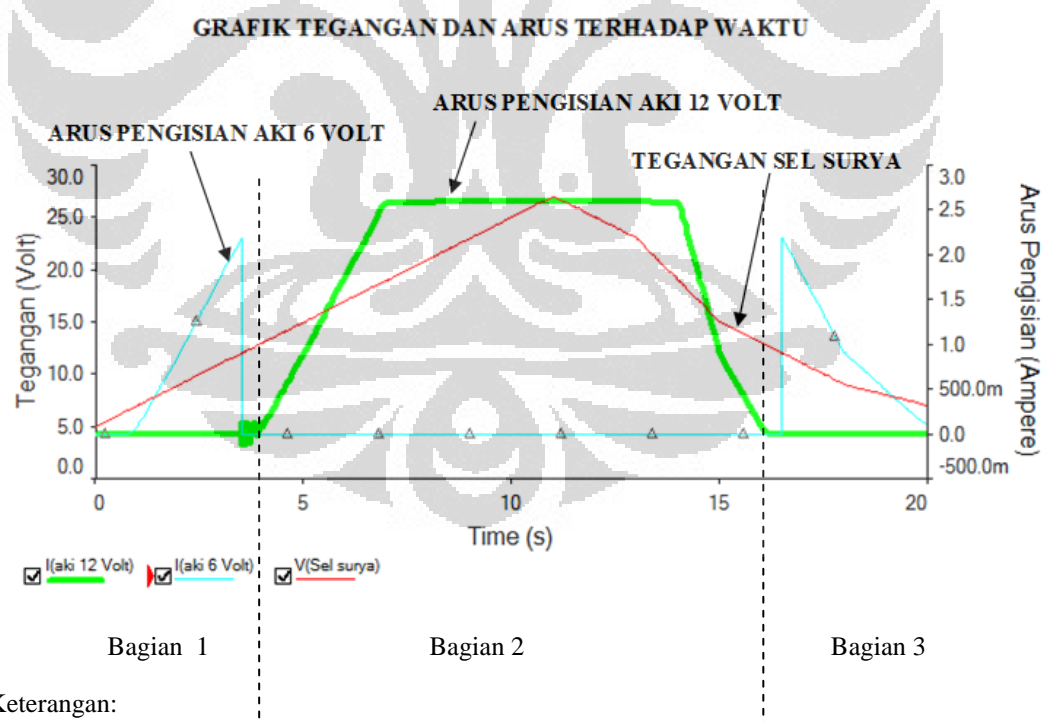


Gambar 3. 12. Simulasi rangkaian dengan menggunakan transistor yang memiliki nilai $h_{fe}(\min)=10$ dan $h_{fe}(\max)=300$.

Pada gambar 3.11, arus maksimum untuk aki 12 Volt adalah 2,613 Ampere dan untuk aki 6 Volt adalah 2,1927 Ampere. Pada gambar 3.12, arus maksimum untuk aki 12 Volt adalah 0,74 Ampere dan untuk aki 6 Volt adalah

0,43 Ampere. Dari gambar grafik dan data di atas dapat dilihat bahwa untuk transistor dengan β (h_{fe}) yang lebih kecil, maka tidak terlalu terlihat batasan arus dengan garis horizontal sempurna. Hal ini karena arus I_C sendiri tidak mencapai batas arus yang ditentukan untuk rangkaian pembatas arus ini bekerja. Arus I_C bernilai kecil karena β , yang merupakan faktor pengali arus basis, juga bernilai kecil. Dapat dilihat pada gambar 3.11 bahwa saat digunakan transistor dengan β yang lebih besar, arus kolektor yang tercatat juga lebih kuat dibandingkan dengan gambar 3.12 yang menggunakan transistor dengan β yang kecil. Namun, kedua transistor ini masih belum memberikan β yang cukup untuk terlihat batas arus di $I \approx 2,6$ Ampere. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa β yang dimiliki oleh transistor akan sangat berpengaruh pada karakteristik pembatasan arus dari rangkaian ini. Hal ini akan membuat I_C dan I_E menjadi lebih besar dan membuat karakteristik rangkaian pembatas arus ini terlihat lebih jelas.

3.2.6 Pengamatan kinerja relay saat selama pergantian posisi on-off



Keterangan:

Bagian 1 = bagian 3 = rezim pengisian aki 6 Volt

Bagian 2 = rezim pengisian aki 12 Volt

Gambar 3. 13. Pembagian kondisi saat relay open dan close

Untuk mengamati kinerja relay, kita dapat membagi grafik yang didapat dari gambar 3.13 menjadi 3 bagian. Bagian 1 dan bagian 3 menunjukkan saat sel surya terhubung dengan aki 6 Volt sementara bagian 2 menunjukkan saat sel surya terhubung dengan aki 12 Volt. Pin normally-closed dari relay dihubungkan ke aki 12 Volt sementara pin satunya lagi dihubungkan ke aki 6 Volt.

Relay yang digunakan pada simulasi ini dikondisikan agar relay tertutup saat tegangan sel surya melebihi 14 Volt dan terbuka saat tegangan sel surya kurang dari 14 Volt. Dapat dilihat dari gambar 4.4 bahwa pada bagian 1 dan 3, tegangan dari sel surya masih dibawah 14 Volt. Kondisi tersebut membuat komparator menghasilkan output dan menghidupkan transistor sehingga relay dapat dialiri arus dan bekerja membuat perpindahan switch dari *pin normally-closed* yang terhubung dengan aki 12 Volt ke pin satunya lagi yang mana terhubung ke aki 6 Volt. Arus mulai mengalir di bagian aki 6 Volt yang ditandai dengan adanya kenaikan pada garis nilai tegangan sel surya sedangkan arus berhenti mengalir di bagian aki 12. Hal ini berlaku sebaliknya saat tegangan sel surya melebihi 14 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa relay bekerja dengan baik pada simulasi ini dengan menjalankan fungsinya sebagai switch otomatis yang didasarkan pada output dari komparator.

BAB 4

RANCANG BANGUN DAN ANALISIS PROTOTIPE RANGKAIAN PEMBATAS ARUS

Pada bab III telah dijelaskan mengenai rangkaian pembatas arus. Pada bab ini, keseluruhan rangkaian tersebut akan dibuat prototipe-nya dengan menggunakan PCB. Pada bab ini juga akan dibahas mengenai analisis prototipe rangkaian yang telah dibuat.

4.1. Rancang Bangun Rangkaian Pembatas Arus

Pada gambar 3.2 dan 3.3 terdapat rangkaian utama pembatas arus. Pembuatan prototipe dilakukan di atas PCB bolong dengan menggunakan kabel sebagai konektor antar komponennya. Gambar 4.1 menunjukkan tampilan prototipe rangkaian pembatas arus yang dibuat untuk penelitian ini.



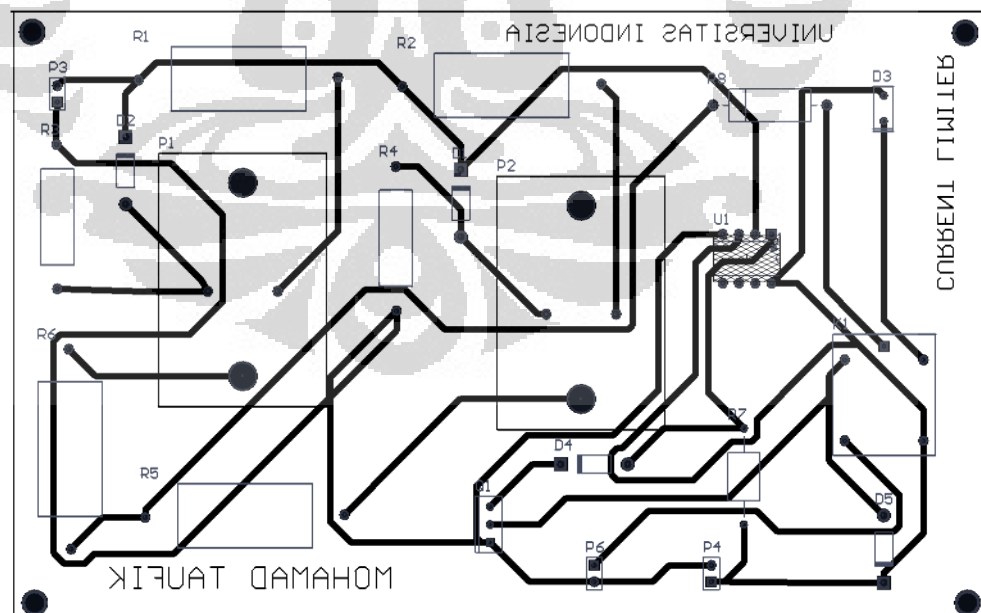
Gambar 4. 1. Prototipe rangkaian utama pembatas arus

Dari gambar 4.1 dapat dilihat komponen-komponen yang digunakan dalam pembuatan prototipe ini. Resistor yang digunakan untuk bagian emiter ialah

resistor 5 Watt dan untuk bagian basis adalah 2 Watt. Besaran ini dipilih untuk mencegah kerusakan resistor akibat disipasi daya di resistor saat pengujian rangkaian[15]. Transistor yang digunakan adalah MJ2955. Transistor ini merupakan transistor PNP yang merupakan komplemen dari 2N3055. Transistor ini memiliki *package* tipe TO-3. MJ2955 merupakan transistor berkemampuan baik dengan nilai V_{CE} maksimum= -60 Volt, disipasi daya maksimum=115 Watt, I_C maksimum= -15 Ampere. *Heatsink* dipasang pada transistor MJ2955 sebagai pengaman tambahan untuk transistor itu sendiri untuk melindungi transistor dari panas berlebih. Pada rangkaian tersebut juga terdapat dioda 6 Ampere. Hal ini karena arus yang mengalir di rangkaian pembata arus ini diperkirakan mencapai 2,6 Ampere sehingga untuk alasan keamanan komponen digunakan dioda 6 Ampere. Dioda ini dipasang untuk mencegah arus balik dari aki saat tegangan sel surya lebih kecil dibandingkan tegangan aki.

4.2. Rancang Bangun Total

Gambar 4.2 menunjukkan prototipe rangkaian relay dimana terdapat komponen komparator dan relay. Prototipe ini dibuat dengan bantuan perangkat lunak Altium Designer 2009.



Gambar 4. 2. Desain rangkaian total

Rangkaian ini akan menghabiskan luasan sebesar 146,28 cm² dengan panjang sebesar 15,3 cm dan lebar 9,56 cm. Gambar 4.3 menunjukkan hasil dari penerapan desain pada gambar 4.2 ke PCB polos setelah melalui proses *etching*, pengeboran, dan penyolderan komponen ke PCB. Dapat dilihat dari gambar 4.3 terdapat komponen LED yang akan hidup mati untuk menunjukkan apakah relay sedang dalam kondisi *close* atau *open*. IC (*Integrated Circuit*) berkaki 8 yang terdapat pada rangkaian adalah komparator LM393N. IC sangat jarang diperbaiki karena saat terdapat 1 komponen rusak di dalamnya, hal yang lebih ekonomis untuk dilakukan adalah dengan menggantinya dengan yang baru [17]. Karena rentan terhadap panas, IC ini dipasangkan di atas *socket*, tentunya setelah *socket* disolder terlebih dahulu. Berdasarkan rancangan awal, relay ini akan menentukan output (P4 dan P6) mana yang akan terhubung ke rangkaian utama yakni rangkaian pembatas arus. Saat tegangan sel surya yang masuk ke pin 1 dari IC lebih besar dari tegangan referensi (aki 12 Volt) yang masuk ke pin 3 IC, maka output komparator akan bernilai *low*, yang menyebabkan rangkaian utama terhubung ke P4 (*nc / normally closed*). Dan saat tegangan sel surya lebih kecil dari tegangan referensi (aki 12 Volt), maka output komparator akan bernilai *high*, yang menyebabkan rangkaian utama terhubung ke P6 (*no / normally open*) dan menyebabkan LED menyala.



Gambar 4. 3. Prototipe rangkaian keseluruhan

4.3. Analisis Rangkaian Pembatas Arus

4.3.1 Rangkaian Pembatas Arus berbeban Aki

Pengujian ini dilakukan dengan cara menghubungkan sel surya ke rangkaian penghubung arus lalu dihubungkan ke aki 12 Volt. Aki yang digunakan ialah aki Premium Nagoya Battery GM5Z-3B 12 Volt dan memiliki kapasitas 7Ah (*Ampere hours*). Pengambilan data dilakukan di lapangan terbuka dan pengujian rangkaian dilakukan dari pagi hari hingga sore hari untuk mendapatkan intensitas cahaya matahari yang beragam. Namun, karena cuaca ataupun intensitas cahaya matahari tidak dapat dikontrol, ada beberapa data yang tidak berhasil didapatkan.

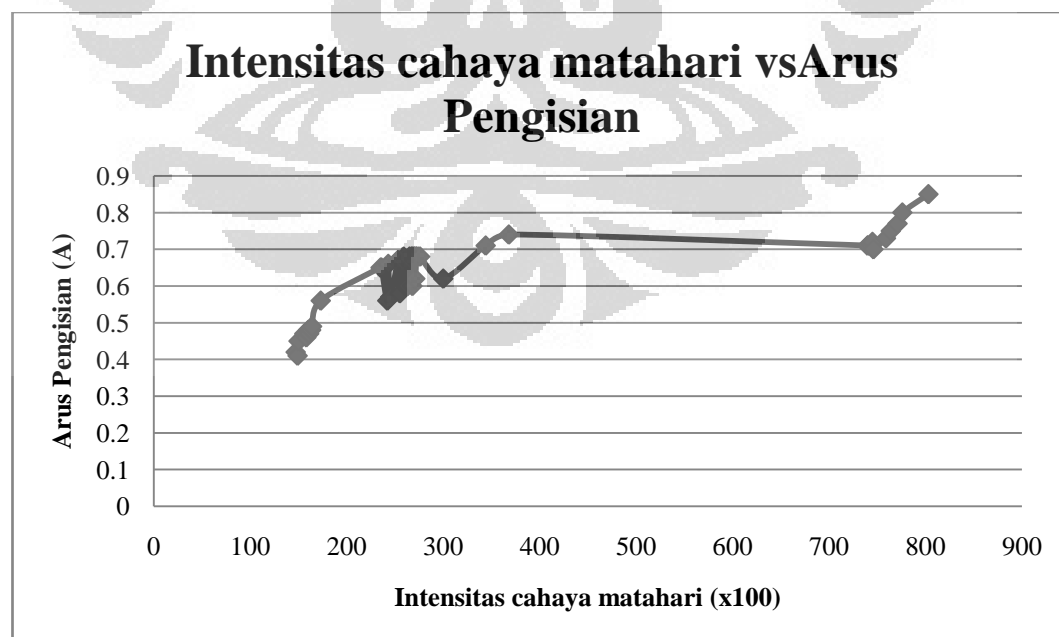
Pada bagian lampiran dapat dilihat data-data yang diambil selama pengujian rangkaian pembatas arus saat rangkaian dihubungkan ke aki. Pengujian ini juga dilakukan dengan menggunakan dua sel surya yang berbeda untuk mendapatkan variasi data yang lebih banyak. Dari data di bagian lampiran untuk pengujian rangkaian berbeban aki, terlihat bahwa pada proses pengujian ini, arus yang mengalir di rangkaian masih belum melewati batas arus maksimum yang telah ditetapkan sebelumnya yakni 2,6 Ampere.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik intensitas cahaya matahari vs arus pengisian yang masuk ke aki untuk sel surya pertama sementara gambar 4.6 menunjukkan grafik intensitas cahaya matahari vs arus pengisian untuk sel surya kedua.

Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa seiring dengan kenaikan intensitas cahaya matahari, arus pengisian yang masuk ke aki juga semakin meningkat. Hal ini dapat ditunjukkan dari data pada lampiran dimana arus pengisian bernilai 0,42 Ampere untuk intensitas cahaya matahari terendah (14700) dan bernilai 0,85 untuk intensitas cahaya matahari tertinggi (80300). Hal ini karena semakin tinggi intensitas cahaya matahari berarti semakin besar jumlah photon yang diserap oleh sel surya. Saat photon yang diserap ini memiliki energi yang lebih besar dari energi *band gap* dari sel surya, maka akan tercipta pasangan elektron dan hole. Selanjutnya *minority carriers* ini akan dikumpulkan oleh *p-n junction* dan akan memisahkan elektron dan hole. Saat kedua sisi sel surya dihubungkan (hubung singkat), maka akan terdapat arus yang mengalir dimana nilai tersebut ialah I_{sc} ,

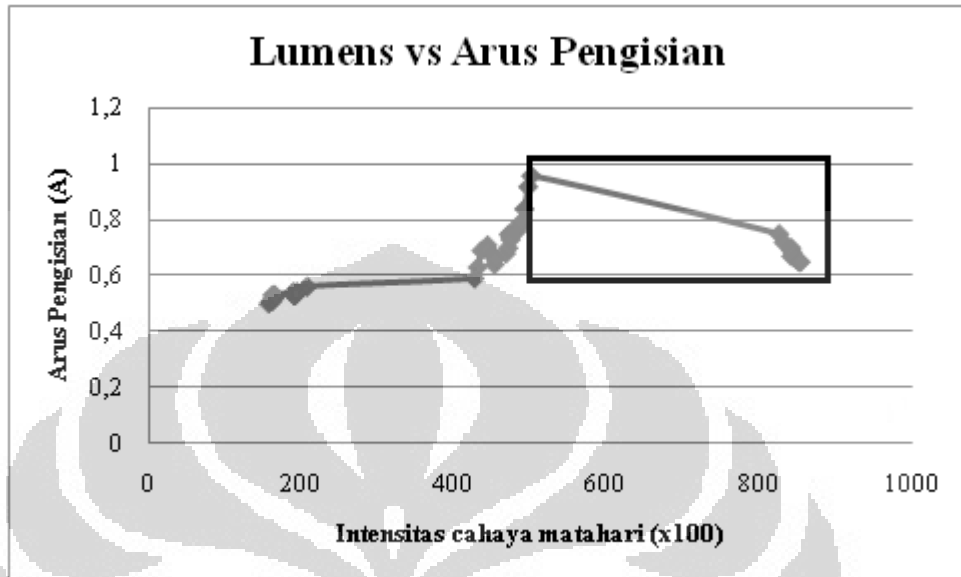
sementara saat disambung ke beban (dalam hal ini aki 12 Volt), maka akan terjadi aliran arus ke aki yang menyebabkan aki terisi. Karena intensitas cahaya matahari akan berbanding lurus dengan jumlah pasangan elektron dan hole yang tercipta, berarti intensitas cahaya matahari juga akan berbanding lurus dengan arus yang tercipta oleh sel surya yang berarti juga berbanding lurus dengan arus yang mengalir ke aki 12 Volt. Gambar 4.4 menunjukkan kesesuaian dengan alasan ini dimana seiring dengan kenaikan intensitas cahaya matahari, maka arus pengisian akan semakin besar. Hal ini karena seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya matahari.

Pada saat dilakukan pengambilan data ini, temperatur transistor tidak panas karena arus yang mengalir masih relatif kecil dan juga karena pemasangan *heat sink* pada transistor. Sedangkan temperatur resistor pada bagian emiter dan kolektor transistor mulai meningkat. Walaupun tidak dicatat dan dimasukkan ke lampiran, namun temperatur resistor memang mengalami peningkatan dan mulai menjadi sedikit panas, padahal daya resistor yang digunakan sudah melebihi disipasi daya di resistor itu sendiri. Namun, resistor masih dapat bekerja walaupun dalam temperatur tersebut walaupun hal ini akan menyebabkan resistansi mengalami sedikit deviasi dari nilai sebenarnya. Perubahan ini juga dapat berpengaruh pada besar arus pengisian.

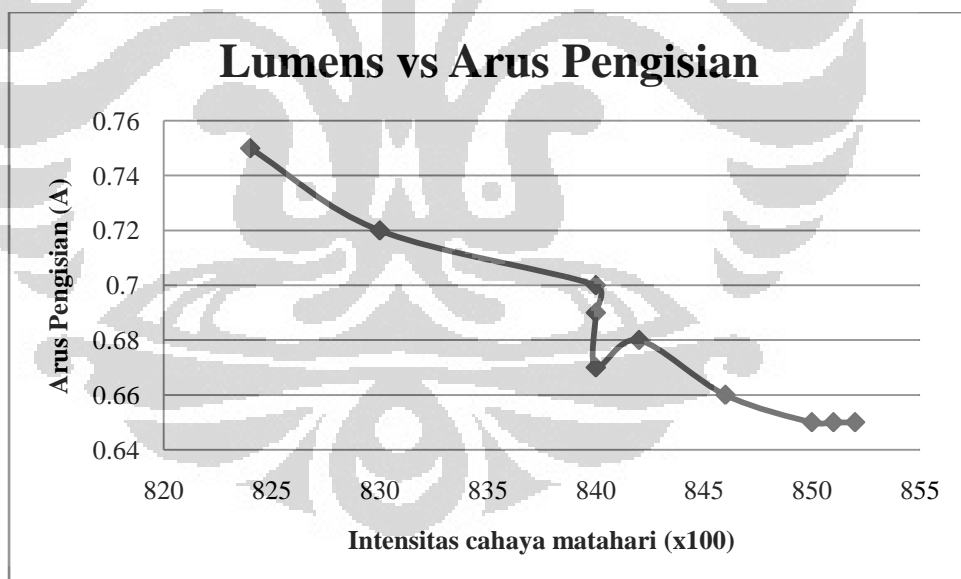


Gambar 4. 4. Grafik pengisian aki untuk sel surya pertama

Gambar 4.5 menunjukkan grafik pengisian aki untuk sel surya kedua dimana proses pengujiannya tetap sama namun dihasilkan grafik yang memiliki perbedaan.



Gambar 4. 5. Grafik pengisian aki untuk sel surya kedua

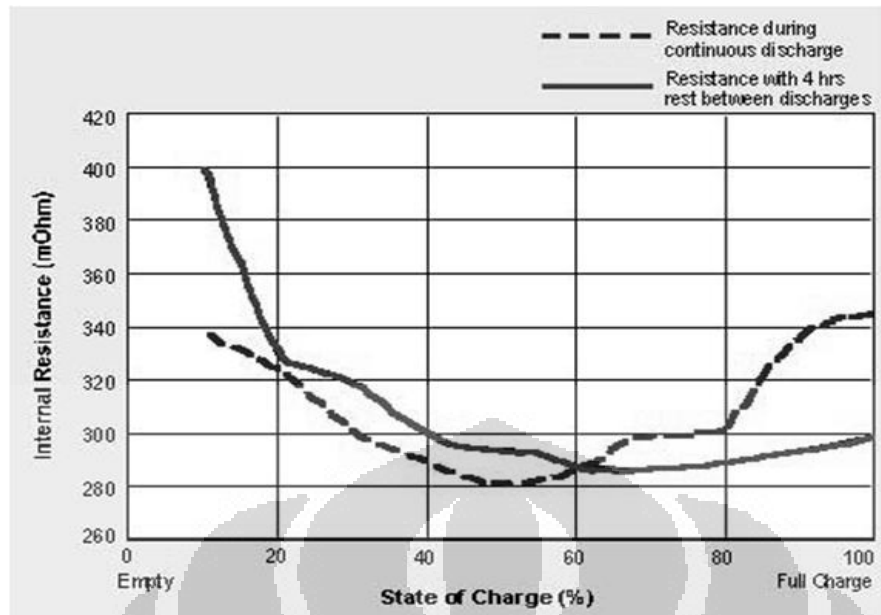


Gambar 4. 6. Pembesaran dari kotak pada gambar 4.5

Untuk nilai intensitas cahaya matahari dari 15700 hingga 50000 pada gambar 4.5, dapat dilihat adanya fenomena seperti pada saat pengujian dengan menggunakan sel surya pertama dimana seiring dengan kenaikan intensitas cahaya

matahari maka arus pengisian yang mengalir ke aki juga akan semakin meningkat. Berbeda dengan pengujian dengan sel surya pertama, pada sel surya kedua (lihat bagian yang dikotaki pada gambar 4.5) terdapat penurunan nilai arus pengisian. Gambar 4.6 menunjukkan grafik khusus untuk data bagian yang mengalami penurunan nilai arus tersebut. Ada beberapa kemungkinan yang dapat menyebabkan fenomena ini. Pertama, panasnya komponen-komponen seperti transistor ataupun resistor pada rangkaian. Hal ini menyebabkan perubahan nilai resistansi komponen-komponen tersebut yang menyebabkan adanya penyimpangan arus pengisian dari nilai yang seharusnya. Kedua, aki sudah mendekati posisi penuh. Kondisi aki yang penuh akan menyebabkan meningkatnya resistansi dalam aki dan secara otomatis akan menurunkan arus pengisian yang masuk ke aki. Sebagai buktinya dapat dilihat dari gambar 4.7 dimana gambar tersebut menunjukkan perubahan nilai resistansi dalam untuk baterai nickel-metal-hydride. Gambar 4.7 menunjukkan bahwa untuk kondisi baterai kosong hingga $\frac{1}{2}$ penuh, resistansi dalam baterai akan berkurang, yang menyebabkan arus pengisian meningkat. Namun, untuk kondisi $\frac{1}{2}$ penuh menuju penuh, nilai resistansi dalam baterai akan mengalami peningkatan yang dapat menyebabkan penurunan nilai arus pengisian.

Pada percobaan ini, tegangan jatuh di rangkaian pembatas arus masih cukup kecil. Namun, untuk kasus tertentu terkadang sel surya diserikan (berarti tegangan *input* bertambah). Hal ini akan menyebabkan tegangan jatuh di rangkaian pembatas arus akan semakin meningkat. Saat arus yang mengalir di rangkaian pembatas arus besar, maka disipasi daya di rangkaian pun akan besar pula. Hal ini akan membahayakan rangkaian pembatas arus. Oleh karena itu, rangkaian pembatas arus ini dibagi menjadi 2 bagian dimana masing-masing bagian akan membatasi arus sebesar 1,3 Ampere dan total keduanya akan berjumlah sebesar 2,6 Ampere.



Gambar 4. 7. Variasi resistansi dalam baterai untuk perubahan kondisi baterai [18]

4.3.2 Rangkaian Pembatas Arus berbeban resistor

Dari data-data sebelumnya, karena arus pengisian masih belum melewati batas arus yang ditetapkan yakni sekitar 2,6 Ampere, maka untuk menunjukkan bahwa rangkaian pembatas arus ini bekerja penulis akan menurunkan nilai batas arus menjadi 10 mAmpere.

Pada percobaan ini, aki 12 Volt akan dihubungkan dengan rangkaian pembatas arus dan akan dihubungkan ke beban resistor yang divariasikan. Tujuan dari pembuatan rangkaian pembatas arus ialah untuk membatasi arus yang mengalir ke beban. Kenaikan arus tersebut dapat disebabkan oleh tegangan suplai yang meningkat ataupun berkurangnya nilai resistansi beban. Oleh karena itu, untuk memenuhi tujuan pembuatan rangkaian pembatas arus diuji dan dibuatlah gambar 4.8. Pengambilan data dilakukan dengan cara menggunakan satu nilai resistansi beban lalu mencatat arus yang mengalir ke beban saat nilai tegangan suplai divariasikan. Setelah itu, nilai resistansi beban divariasikan dan arus yang mengalir ke beban dicatat lagi. Nilai 10 mAmpere didapat dengan mengganti beban resistor di emiter menjadi 56 Ω .

$$V_{zener} - V_{di} R_{limit} - V_{be} = 0 \quad (2)$$

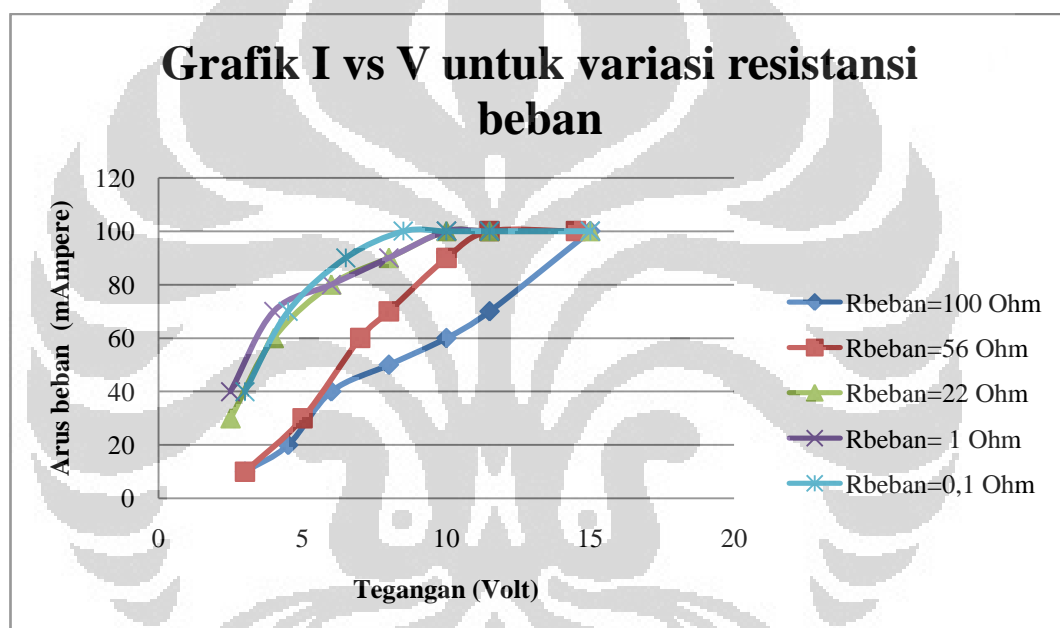
$$3,6 - V_{di} R_{limit} + 0,7 = 0$$

$$V \text{ di } R_{\text{limit}} = 2,9$$

$$I \times R_{\text{limit}} = 2,9$$

$$I = \frac{2,9}{56} \approx 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA} \quad (6)$$

Dari persamaan (6) di atas didapatkan batas arus sebesar 50 mA akan tetapi karena arus *output* merupakan total dari dua rangkaian pembatas arus, maka batas arus 50 mA tinggal dikali dengan faktor pengali 2 sehingga didapatkan batas arus baru yakni 100 mA.



Gambar 4. 8. Grafik I vs V untuk variasi resistansi beban

Gambar 4.8 menampilkan hasil pengujian rangkaian pembatas arus setelah batas arusnya dikecilkan menjadi 100 mA. Dari data di lampiran dapat dilihat bahwa arus maksimumnya bernilai 100 mA.

Pengambilan data dilakukan dengan cara menghubungkan konektor untuk tegangan input di rangkaian dengan DC adaptor 3-15 Volt. Keseluruhan grafik ini juga didapat dengan memvariasikan resistansi beban dengan nilai 100 Ω , 56 Ω , 22 Ω , 1 Ω , dan 0,1 Ω . Dapat dilihat bahwa seiring dengan kenaikan tegangan, maka arus yang mengalir pun lebih besar. Namun, saat arus sudah mencapai batas yang ditentukan, arus tidak akan bisa melebihi nilai batas arus walaupun tegangan terus dinaikkan. Ketika bebannya diturunkan secara variatif, arus yang mengalir ke

beban lebih cepat mencapai ke batas arus untuk nilai tegangan yang sama jika dibandingkan dengan tegangan saat resistansi lebih besar. Hal yang terlihat jelas adalah walaupun beban telah diturunkan sekecil mungkin dan tegangan terus dinaikkan, arus maksimum yang terdeteksi di multimeter digital tetaplah 100 mA. Arus yang mengalir di beban akan dijaga konstan di nilai 100mA karena arus ini akan mengikuti batas arus maksimum yang pada resistor yang ditempatkan di emiter. Arus pada resistor bagian emiter adalah hasil dari pembagian nilai tegangan jatuh di resistor dengan nilai resistansinya. Karena nilai tegangan jatuh di bagian resistor emiter (tegangan resistor sama dengan tegangan zener dikurangi tegangan basis-emiter transistor) adalah tetap dan resistansi resistor di emiter juga tetap, maka saat dioda zener telah bekerja arus akan terbatas di nilai arus maksimum yakni 100 mA. Hal ini menunjukkan bahwa rangkaian pembatas arus ini telah bekerja.

4.4. Analisis Relay

Gambar 4.3 menunjukkan prototipe rangkaian relay yang telah dibuat dengan bantuan perangkat lunak Altium Designer Summer 2009. Rangkaian relay yang telah dibuat ini telah diuji pada penelitian ini akan tetapi rangkaian relay ini tidak berjalan semestinya. Hal ini karena penggunaan komparator yang berada di rangkaian relay ini berdasarkan perbandingan tegangan. Seharusnya saat input komparator dari sel surya melebihi input komparator dari aki, LED mati dan saat input komparator dari sel surya kurang dari input komparator dari aki, maka LED akan hidup. Namun, dalam pengujiannya saat sel surya dihubungkan ke rangkaian lalu ke aki, tegangan sel surya akan selalu bernilai di atas tegangan baterai. Hal ini terjadi karena berlakunya hukum tegangan Kirchoff, dimana dikatakan bahwa *“The algebraic sum of voltage drops around any closed path is zero.* [6] “ Seperti yang dikatakan pada hukum tegangan Kirchoff bahwa jumlah perbedaan tegangan di suatu rangkaian tertutup adalah nol. Saat mendekati proses pengujian dengan hukum ini, didapatkan persamaan:

$$\text{tegangan sel surya} + \text{tegangan jatuh rangkaian} + \text{tegangan aki} = 0$$

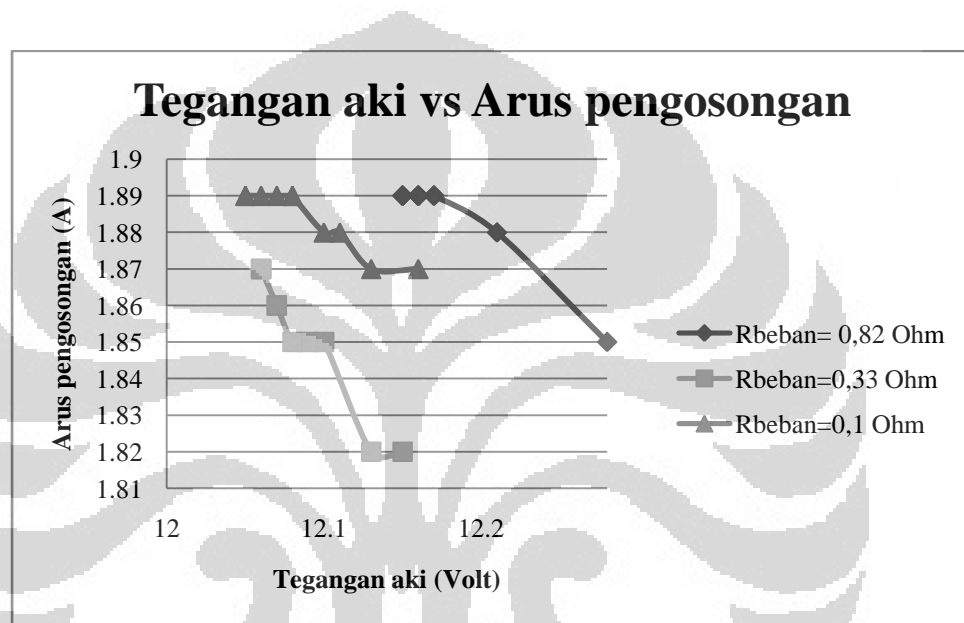
$$\text{tegangan sel surya} = \text{tegangan jatuh rangkaian} + \text{tegangan aki} \quad (7)$$

Nilai tegangan aki adalah tetap sementara tegangan jatuh di rangkaian akan bernilai positif. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan sel surya akan selalu lebih berada di atas tegangan aki. Padahal, untuk relay ini bekerja dibutuhkan tidak hanya tegangan sel surya yang melebihi tegangan aki tetapi juga tegangan sel surya yang bernilai kurang dari tegangan aki. Hal ini menyebabkan relay ini tidak dapat bekerja di rangkaian keseluruhan ini. Oleh karena itu, penulis hanya menampilkan data-data pengujian rangkaian pembatas arus tanpa relay dan komparator. Seperti yang dikatakan oleh Isidor Buncmann, pendiri dan CEO dari Cadex Electronic Inc. yang sudah lama berkecukupan di studi mengenai pengisian baterai, *“When observing the battery, there is no black and white, but many shades of gray. In fact, the battery behaves much like a human being. It is mystical, unexplainable and can never be fully understood. For some users, the battery causes no problems at all, for others it is nothing but a problem. Perhaps a comparison can be made with the aspirin. For some, it works to remedy a headache, for others the headache gets worse. And no one knows exactly why.”*[21]

Dari permasalahan di atas dapat diketahui bahwa dalam rangkaian pembatas arus pada sistem sel surya yang digunakan untuk mengisi baterai ini, hipotesis awal yang menggunakan komparasi tegangan untuk pengkondisian hidup-matinya relay adalah tidak tepat. Hal ini karena sel surya ternyata tidak dapat dimisalkan sebagai sebuah sumber tegangan melainkan sebagai sebuah sumber arus. Untuk menjawab permasalahan ini, salah satu solusi yang dapat diusulkan penulis adalah dengan cara mengganti input yang akan dikomparasi antara kedua terminal input komparator. Jika sebelumnya input yang akan dikomparasi ialah berbasis tegangan, maka kini input yang dikomparasi ialah berbasis arus. Dengan demikian, dibutuhkan tambahan suatu rangkaian pendeteksi arus untuk mendeteksi arus yang mengalir ke aki yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai referensi. Saat arus yang mengalir keluar dari rangkaian pembatas arus masih bernilai besar yang mengindikasikan cahaya matahari yang masih terang, sel surya dan rangkaian pembatas arus akan terhubung dengan aki 12 Volt sedangkan saat arus yang mengalir keluar dari rangkaian lebih kecil dari nilai referensi yang ditentukan, yang menandakan

intensitas cahaya matahari yang kurang, sel surya dan rangkaian pembatas arus akan terhubung ke aki 6 Volt. Perbaikan lainnya ialah dengan menggunakan rangkaian current mirror. Sebuah rangkaian *current mirror* adalah rangkaian yang didesain untuk meng-kopi arus yang melalui suatu divais dengan cara mengontrol arus di sebuah divais lainnya[22]. Arus yang dikopi pada kasus ini dapat berupa sumber arus yang bervariasi, dan dapat menghasilkan arus output yang konstan.

4.5. Analisis Pengosongan Aki



Gambar 4. 9. Grafik pengosongan aki dengan variasi resistansi beban

Gambar 4.9 menunjukkan grafik pengosongan aki yang didapat dari data pada lampiran. Percobaan ini dilakukan dengan cara menghubungkan aki 12 Volt dengan rangkaian pembatas arus dan menghubungkannya lagi dengan beban resistor. Pengambilan data dilakukan setiap 1 menit untuk setiap resistansi beban. Percobaan di subbab ini mirip dengan percobaan di subbab 4.3.2. Namun, terdapat perbedaan di antara keduanya. Pada subbab 4.3.2 arus maksimum dibatasi pada arus maksimum yang jauh lebih kecil daripada nilai arus maksimum yang digunakan pada subbab ini. Pada subbab 4.3.2, nilai resistansi resistor di bagian emiter diganti agar batas maksimumnya ikut berubah menjadi 10 mAmpere, sementara pada subbab ini nilai resistansinya dibuat agar batasan arus ada di 2,6

Ampere. Alasan untuk kedua percobaan ini pun berbeda. Pada subbab 4.3.2, percobaan tersebut dilakukan untuk melihat kinerja rangkaian pembatas arus yang membatasi arus di nilai yang kecil karena pada pengambilan data di 4.3.1 belum terlihat kinerja rangkaian pembatas arus akibat arus yang mengalir masih di bawah arus yang ditetapkan. Sementara untuk subbab ini, ada beberapa alasan mengapa pengambilan data ini dilakukan. Pertama, pengambilan data ini dilakukan untuk melihat karakteristik aki saat dikosongkan di mana dilihat nilai arus pengosongan yang mengalir dan kondisi awal tegangan aki sebelum dikosongkan dan tegangan setelah dikosongkan. Kedua, pengambilan data ini dilakukan untuk mengosongkan aki agar tidak terjadi *overcharging* karena aki digunakan berulang-ulang pada proses pengisian aki bersumber sel surya. Jika aki diisi terus pada proses pengisian aki bersumber sel surya walaupun sudah penuh, akibatnya air aki akan berkurang akibat penguapan, dan efek sampingnya bisa merusak bagian atas pelat *cell* aki. Kemungkinan terburuknya dapat membuat aki rusak total dan meledak.[19]

Ada sedikit penyimpangan dari pembatasan arus yang terlihat pada saat proses pengosongan aki ini. Dari proses pengujian yang telah dilakukan, telah didapatkan bahwa arus maksimum yang terbatas di rangkaian ini bernilai $\approx 1,88$ Ampere. Padahal, berdasarkan proses perhitungan sebelumnya, telah ditentukan nilai batas arus atasnya adalah 2,6 Ampere. Dari sini dapat kita ambil nilai persentase errornya yakni:

$$\% \text{ error} = \frac{|\text{nilai eksperimen} - \text{nilai teoritis}|}{\text{nilai teoritis}} \times 100 \% \quad [20]$$

$$\% \text{ error} = \frac{|1,88 - 2,6|}{2,6} \times 100 \% \quad (8)$$

$$\% \text{ error} = 27,69 \%$$

Persentase error dari persamaan (8) ini dapat muncul karena pengaruh temperatur komponen pada saat pengujian. Seperti misalnya saat transistor menjadi panas, resistansinya akan bertambah, dan hal ini akan menyebabkan arus yang terdeteksi lebih rendah dari nilai yang seharusnya.

Dari percobaan ini terlihat kinerja penggunaan rangkaian pembatas arus berbasis transistor ini. Pada percobaan ini, terlihat bahwa arus sudah terbatas di

nilai 1,88 Ampere. Pada percobaan suplai tegangannya bernilai 12 Volt sementara tegangan di beban adalah arus dikali besar resistansi beban yang pada data yang didapat dari lampiran bagian pengosongan aki bernilai kurang dari 2 Volt. Jadi, pada rangkaian pembatas arus ini terdapat tegangan jatuh sebesar 10 Volt. Tegangan jatuh di rangkaian pembatas arus akan dibagi pada komponen resistor di bagian emiter, resistor di bagian kolektor dan tegangan jatuh di V_{CE} dari transistor. Pada desain awal, tidak diletakkan resistor di bagian kolektor. Namun, pada rangkaian pembatas arus ini terdapat resistor yang diletakkan di bagian kolektor untuk membagi disipasi daya agar resistor di bagian emitter dan transistor tidak terlalu besar. Komponen resistor saja sebenarnya dapat digunakan sebagai rangkaian pembatas arus pasif, tetapi disipasi daya di resistor akan tergantung dari besarnya arus yang melewati resistor tersebut. Semakin besar arus, semakin besar pula disipasi daya dan menunjukkan semakin rawannya komponen tersebut untuk rusak. Namun, dengan menggunakan rangkaian pembatas arus ini, disipasi daya akan terbagi di komponen transistor pula, dimana transistor tertentu memiliki kemampuan disipasi daya maksimum yang cukup tinggi. Sebagai contoh, transistor MJ2955 yang digunakan di percobaan ini memiliki kemampuan untuk menangani disipasi daya maksimum sebesar 115 Watt. Hal ini akan membuat rangkaian pembatas arus ini aman sambil membuat batasan arus maksimum yang aman untuk apapun yang dihubungkan ke bagian input dan output dari rangkaian pembatas arus ini. Walaupun demikian, tetap saja terdapat panas yang menunjukkan adanya disipasi daya di rangkaian pembatas arus seperti resistor. Hal ini akan menyebabkan adanya penyimpangan nilai resistansi dari nilai sebenarnya dan akan mempengaruhi data pengujian. Pada simulasi tidak dapat ditentukan temperatur yang terdeteksi pada komponen-komponen di rangkaian sehingga menghasilkan data yang relatif ideal padahal pada proses pengujian rangkaian yang sebenarnya ada faktor-faktor lain yang menyebabkan ketidak idealan dari rancangan awal. Karena arus dari rangkaian pembatas arus total ini merupakan ini penjumlahan dari dua rangkaian pembatas arus, maka untuk penyimpangan nilai resistansi yang terjadi di komponen-komponen, efeknya akan menjadi dua kali lipatnya.

BAB 5

PENUTUP

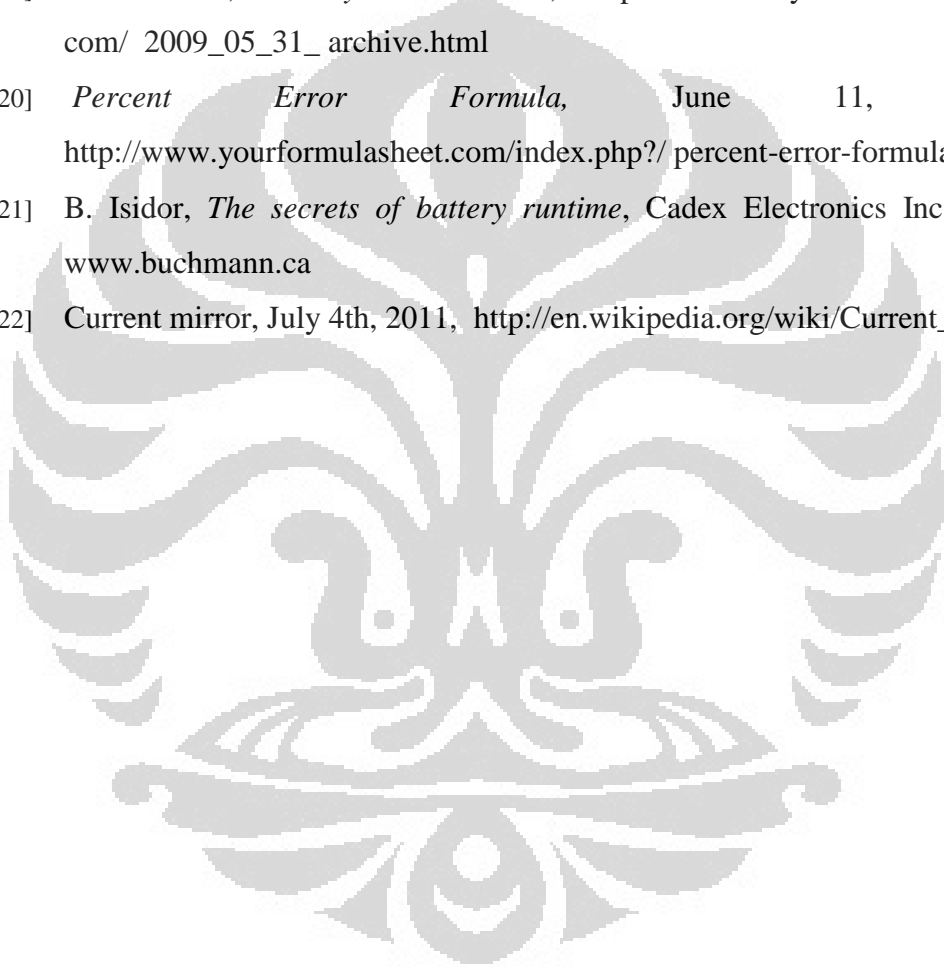
Kesimpulan

1. Rangkaian pembatas arus yang dibuat di penelitian ini dapat digunakan untuk membatasi arus hingga 1,88 Ampere.
2. Terjadi persentase error sebesar $\approx 27\%$.
3. Arus yang mengalir akan berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari.
4. Penambahan resistor di bagian kolektor akan membantu pembagian disipasi daya di rangkaian pembatas arus sehingga tidak terlalu membebani transistor dan resistor di bagian emiter.
5. Semakin penuh isi dari suatu aki, hambatan dalamnya akan semakin meningkat yang berarti akan mengurangi besar nilai arus yang melewatinya.

DAFTAR REFERENSI

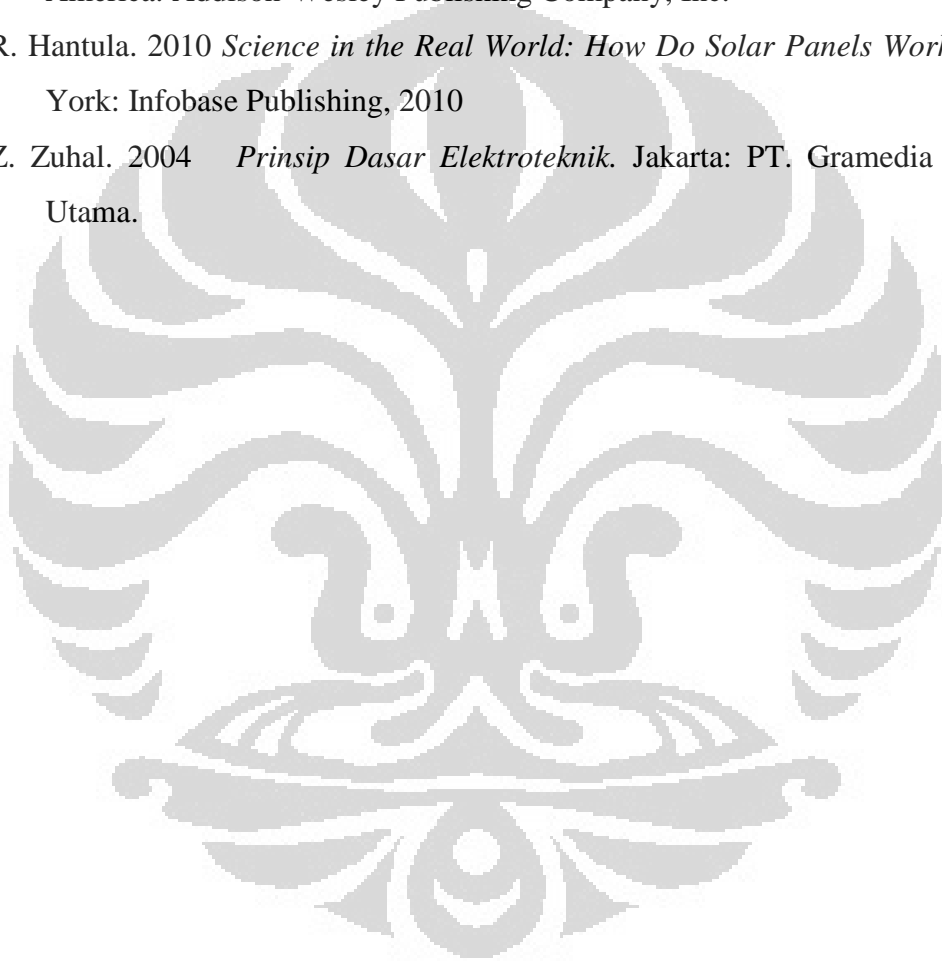
- [1] D. E. Burger, *Electrical & Electronic & Telecommunications Milestone History in Australia*, 2006, p.1
- [2] R. Hantula, *Science in the Real World: How Do Solar Panels Work?*, New York: Infobase Publishing, 2010, pp14-17.
- [3] Zhiping Yang, Hongkun Chen , Qingren Jin, Dongfang Zheng, Tao Liu , Wenfeng Bu, *Dynamic Simulation of the Overvoltage for Fault Current Limiter*, China, 2011, p.1
- [4] *Current Limiting Circuit*, May 30, 2011, <http://www.vidisonic.com/2008/07/10/current-limiting-circuit/>.
- [5] *Current regulators*, December 30, 2010, <http://www.tpub.com/neets/book7/271.htm>.
- [6] D. E. Johnson, J. R. Johnson, J. L. Hilburn, P. D. Scott, *Electric Circuit Analysis* (3rd ed.),(n.d), Prentice Hall.
- [7] N.R. Thomson, J.L. Bähr , “Transistor”, April 4, 2006, p.9
- [8] *Relay, The Basic of (How They Work)*, Document# 999403, The Install Doctor^xTM, 2000, p.2
- [9] *Transistor Pertemuan Dwikutub*, June 6, 2011, http://id.wikipedia.org/wiki/Transistor_Bipolar
- [10] Z. Zuhail, *Prinsip Dasar Elektroteknik*, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 2004, pp138-140
- [11] *Akumulator (aki)*, June 5, 2011, http://www.battery-accu-aki.com/category.php?id_category=52
- [12] *Teknik Dasar Batere dan UPS*, Bagian Proyek Pengembangan Kurikulum Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional, 2003, pp.15-19.
- [13] I. Buchmann, *What is the Perfect Battery*, April 2001, <http://www.buchmann.ca/article4-page1.asp>
- [14] *Relays*, December 30, 2010, <http://www.kpsec.freeuk.com/components/relay.htm>
- [15] *Resistor*, December 30, 2010, <http://en.wikipedia.org/wiki/Resistor>

- [16] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. ,1996, ch.10
- [17] R. L. Boylestad,, Louis Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory* (9th edition), Depok : Universitas Indonesia, 2006, p.462
- [18] *How does Internal Resistance affect Performance*, April 21, 2011, <http://batterybuynow.blogspot.com/2011/04/how-does-internal-resistance-affect.html>
- [19] M.Y.Riswan, *Battery/Aki Meledak*, http://mohamadyanriswan.blogspot.com/2009_05_31_archive.html
- [20] *Percent Error Formula*, June 11, 2011, <http://www.yourformulasheet.com/index.php?/percent-error-formula.html>
- [21] B. Isidor, *The secrets of battery runtime*, Cadex Electronics Inc., 2001, www.buchmann.ca
- [22] *Current mirror*, July 4th, 2011, http://en.wikipedia.org/wiki/Current_mirror



DAFTAR PUSTAKA

- D. E. Johnson, J. R. Johnson, J. L. Hilburn, P. D. Scott. (n.d.) *Electric Circuit Analysis* (3rd ed.). Prentice Hall.
- R. L. Boylestad, Louis Nashelsky. 2006. *Electronic Devices and Circuit Theory* (9th edition). Depok : Universitas Indonesia.
- R. F. Pierret. 1996. *Semiconductor Device Fundamentals*. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- R. Hantula. 2010 *Science in the Real World: How Do Solar Panels Work?*. New York: Infobase Publishing, 2010
- Z. Zuhail. 2004 *Prinsip Dasar Elektroteknik*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.



LAMPIRAN

Lampiran 1 : Data Pengisian Baterai untuk Sel Surya 1

Hari, Tanggal : Sabtu s/d Kamis, 4 s/d 9 Juni 2011

Tempat : Di depan kontainer Teknik Elektro

No.	Lum	Vsc	I _L	Vbat
1	259	17,28	0,68	14,04
2	265	17,32	0,68	14,12
3	267	17,35	0,68	14,18
4	270	17,39	0,68	14,22
5	270	17,4	0,68	14,25
6	272	17,42	0,68	14,28
7	274	17,44	0,68	14,24
8	276	17,46	0,68	14,3
9	272	17,45	0,68	14,3
10	268	17,43	0,68	14,29

No.	Lum	Vsc	I _L	Vbat
1	265	17,41	0,67	14,28
2	264	17,4	0,67	14,28
3	263	17,39	0,67	14,27
4	262	17,38	0,67	14,27
5	257	17,37	0,67	14,26
6	253	17,36	0,67	14,26
7	253	17,3	0,67	14,25
8	243	17,31	0,66	14,25
9	236	17,21	0,65	14,22
10	235	17,21	0,65	14,22

No.	Lum	Vsc	I _L	Vbat
1	149	15,01	0,41	12,93
2	147	15,04	0,42	12,94
3	150	15,14	0,45	12,97
4	156	15,21	0,47	13
5	160	15,28	0,48	13,02
6	163	15,29	0,48	13,03
7	161	15,24	0,47	13,04
8	158	15,25	0,46	13,05
9	164	15,4	0,49	13,07
10	173	15,52	0,56	13,1

No.	Lum	Vsc	I _L	Vbat
1	368	17,49	0,74	14,4
2	344	17,61	0,71	14,71
3	300	17,34	0,62	14,67
4	271	17,18	0,62	14,56
5	268	17,14	0,6	14,57
6	263	17,14	0,6	14,55
7	261	17,13	0,6	14,55
8	255	17,1	0,58	14,56
9	245	17,04	0,57	14,56
10	242	17,02	0,56	14,57

(Lanjutan)

No.	Lum	V _{sc}	I _L	V _{bat}
1	803	16,58	0,85	13,1
2	776	16,71	0,8	13,33
3	771	16,76	0,77	13,47
4	764	16,79	0,75	13,59
5	759	16,8	0,73	13,66
6	745	16,81	0,72	13,7
7	740	16,83	0,71	13,75
8	740	16,84	0,71	13,75
9	744	16,85	0,71	13,78
10	746	16,85	0,7	13,8

Keterangan:

Lum= Intensitas cahaya matahari (x 100 Lux)

V_{bat} = Tegangan aki (Volt)

V_{sc} = Tegangan sel surya (Volt)

I_L = Arus yang mengalir ke aki (Ampere)

Lampiran 2 : Data Pengisian Baterai untuk Sel Surya 2

Hari, Tanggal : Sabtu s/d Kamis, 4 s/d 9 Juni 2011

Tempat : Di depan kontainer Teknik Elektro

No.	Lum	Vsc	I_L	Vbat
1	500	17,79	0,96	14,1
2	496	17,87	0,92	14,17
3	491	17,97	0,84	14,37
4	486	18,01	0,79	14,58
5	485	18,03	0,78	14,69
6	481	18,05	0,76	14,7
7	471	18,04	0,75	14,74
8	472	18,04	0,75	14,76
9	473	18,06	0,73	14,77
10	472	18,05	0,74	14,78

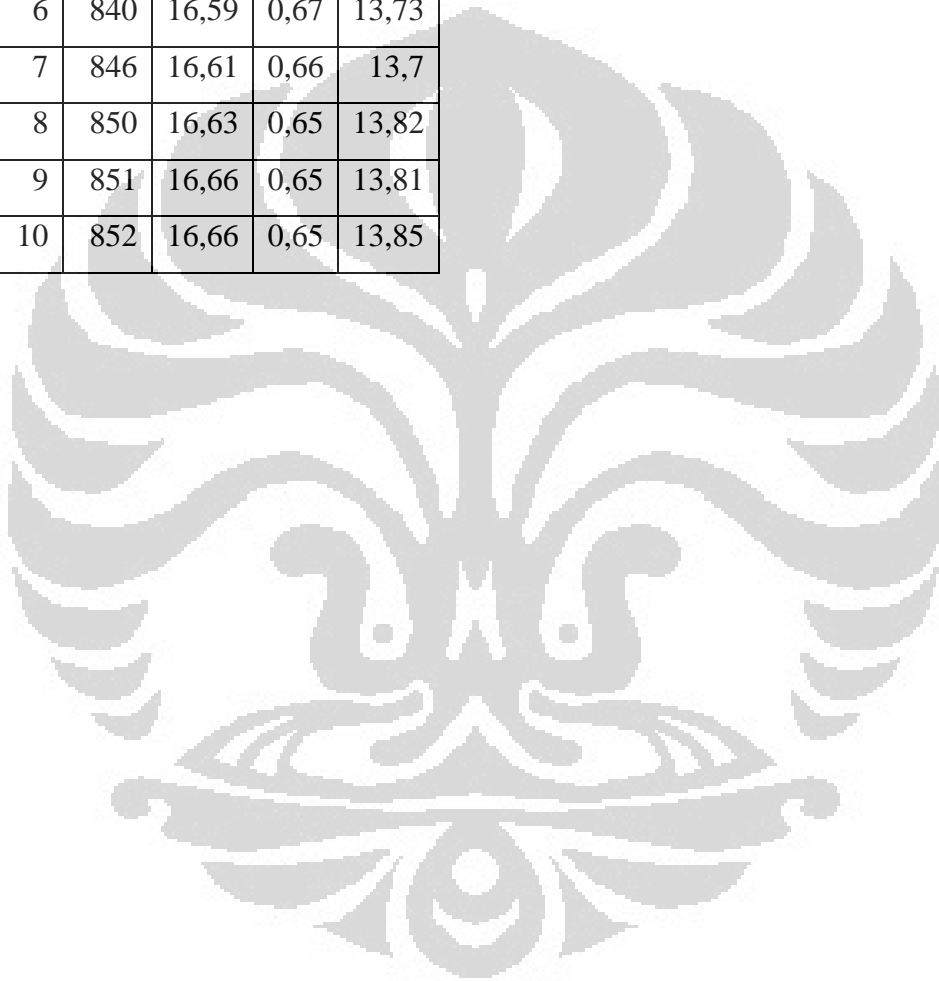
No.	Lum	Vsc	I_L	Vbat
1	443	17,85	0,71	14,07
2	435	17,99	0,69	14,27
3	444	18,05	0,69	14,38
4	452	18,11	0,67	14,44
5	453	18,16	0,66	14,46
6	452	18,1	0,64	14,48
7	430	17,99	0,63	14,44
8	426	18,1	0,59	14,33
9	470	18,07	0,7	14,65
10	467	18,05	0,68	14,64

No.	Lum	Vsc	I_L	Vbat
1	157	15,31	0,5	13,02
2	161	15,41	0,51	13,06
3	162	15,45	0,51	13,09
4	163	15,51	0,52	13,12
5	165	15,55	0,53	13,15
6	164	15,54	0,52	13,16
7	163	15,56	0,52	13,16
8	164	15,57	0,53	13,17
9	163	15,56	0,52	13,17
10	162	15,57	0,53	13,17

No.	Lum	Vsc	I_L	Vbat
1	207	16,32	0,56	13,86
2	189	16,29	0,54	13,91
3	189	16,33	0,54	13,96
4	190	16,38	0,53	14,03
5	190	16,41	0,53	14,05
6	191	16,43	0,53	14,07
7	192	16,45	0,53	14,09
8	193	16,46	0,54	14,1
9	194	16,46	0,54	14,11
10	194	16,49	0,54	14,12

(Lanjutan)

No.	Lum	Vsc	I_L	Vbat
1	824	16,4	0,75	13,35
2	830	16,48	0,72	13,47
3	840	16,51	0,7	13,52
4	840	16,54	0,69	13,61
5	842	16,57	0,68	13,67
6	840	16,59	0,67	13,73
7	846	16,61	0,66	13,7
8	850	16,63	0,65	13,82
9	851	16,66	0,65	13,81
10	852	16,66	0,65	13,85



Lampiran 3 : Data Pengosongan Baterai

Hari, Tanggal : Senin s/d Rabu, 6 s/d 8 Juni 2011

Tempat : Di depan kontainer Teknik Elektro

R=0,82			
No.	Vbat	V _L	I _C
1	12,28	1,61	1,85
2	12,21	1,62	1,88
3	12,17	1,645	1,89
4	12,17	1,648	1,89
5	12,16	1,648	1,89
6	12,16	1,651	1,89
7	12,16	1,652	1,89
8	12,15	1,654	1,89
9	12,15	1,655	1,89
10	12,15	1,665	1,89
Rata-rata			1,885

R=0,33			
No.	Vbat	V _L	I _C
1	12,15	0,6	1,82
2	12,13	0,698	1,82
3	12,1	0,724	1,85
4	12,09	0,734	1,85
5	12,08	0,723	1,85
6	12,07	0,722	1,86
7	12,07	0,735	1,86
8	12,06	0,733	1,87
9	12,06	0,745	1,87
10	12,06	0,751	1,87
Rata-rata			1,852

(Lanjutan)

R=0,1			
No.	V _{bat}	V _L	I _C
1	12,16	0,203	1,87
2	12,13	0,206	1,87
3	12,11	0,209	1,88
4	12,1	0,211	1,88
5	12,08	0,213	1,89
6	12,08	0,213	1,89
7	12,07	0,2134	1,89
8	12,06	0,2139	1,89
9	12,05	0,2142	1,89
10	12,05	0,2144	1,89
Rata-rata			1,884

Rata-rata I_C total untuk semua beban = 1,873667 Ampere

Keterangan:

V_{bat} = tegangan aki (Volt)

V_L = tegangan beban (Volt)

I_C = arus yang mengalir ke beban (Ampere)

R = resistansi beban (Ω)

Lampiran 4 : Pengujian Rangkaian Pembatas Arus dengan Adaptor

Hari, Tanggal : Jumat, 9 Juni 2011

Tempat : Laboratorium Elektronika Departemen Teknik Elektro

R=0,1		
No.	V_A	I_L
1	3	40
2	4,5	70
3	6,5	90
4	8,5	100
5	10	100
6	11,5	100
7	15	100

R=22		
No.	V_A	I_L
1	2,5	30
2	4	60
3	6	80
4	8	90
5	10	100
6	11,5	100
7	15	100

R=1		
No.	V_A	I_L
1	2,5	40
2	4	70
3	6	80
4	8	90
5	10	100
6	11,5	100
7	15	100

R=56		
No.	V_A	I_L
1	3	10
2	5	30
3	7	60
4	8	70
5	10	90
6	11,5	100
7	14,5	100

Keterangan:

V_A =Tegangan Adaptor (Volt)

I_L =Arus beban (mAmpere)

R=100		
No.	V_A	I_L
1	3	10
2	4,5	20
3	6	40
4	8	50
5	10	60
6	11,5	70
7	15	100