

SKRIPSI

**OPTIMALISASI PANEL SEL SURYA
DENGAN MENGGUNAKAN SISTEM PELACAK
BERBASIS MIKROKONTROLER AT89C51**

BUDI YUWONO

M0200002

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh derajat Sarjana Sains
pada Jurusan Fisika



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2005**

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi intelektual skripsi ini adalah hasil kerja saya dan sepengetahuan saya hingga saat ini isi skripsi tidak berisi materi yang telah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain atau materi yang telah diajukan untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di Universitas Sebelas Maret atau di Perguruan Tinggi lainnya kecuali telah dituliskan di daftar pustaka skripsi ini dan segala bentuk bantuan dari semua pihak telah ditulis di bagian ucapan terima kasih.

Surakarta, Februari 2005

Penulis

Budi Yuwono

SKRIPSI
OPTIMALISASI PANEL SEL SURYA
DENGAN MENGGUNAKAN SISTEM PELACAK
BERBASIS MIKROKONTROLER AT89C51

BUDI YUWONO
M0200002

Dinyatakan lulus ujian skripsi oleh tim penguji

Pada hari Selasa, tanggal 15 Februari 2005

Tim Penguji

Ir. Ari Handono Ramelan, M.Sc, Ph.D (Ketua)
Nuryani, M.Si (Sekretaris)
Artono Dwijo Sutomo, M.Si
Agus Supriyanto, M.Si

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
memperoleh gelar sarjana sains

Dekan

Ketua Jurusan Fisika

Drs. H.Marsusi, M.S

NIP. 130 906 776

Drs. Harjana, M.Si., Ph.D.

NIP. 131 570 309

MOTTO

“ Jadikan sabar dan sholat sebagai penolongmu. Dan sesungguhnya yang demikian itu sungguh berat, kecuali bagi orang-orang yang khusyu’ “

(QS. Al Baqoroh:45)

“Allah mengangkat orang-orang yang beriman diantara kalian dan orang-orang yang diberikan ilmu beberapa derajat”

(Al Mujadalah: 11)

“ Ilmu adalah apa Perkataan Allah dan apa Perkataan Rosulullah dengan pemahaman salafunasholeh”

PERSEMBAHAN

Karya tulis ini dipersembahkan untuk:

- Ø Bapak-Ibunda tercinta, Terimakasih atas segala bantuan dan doa sehingga masa perkuliahan dan penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan.
- Ø Saudara-saudaraku Mba Ning dan Mba Tri yang telah memberikan dorongan dan bantuan yang tulus.
- Ø Teman-teman di Instrumentasi Elektronika Mas David, Doni, Tunjung, Arifin, Supriyadi atas kebersamaannya selama ini.
- Ø Teman-teman Salafiyun Mas Kholid, Mas Musthofa, Mas Tri, Sapto, Alfandi, Muhammad, Sufyan, Wahid, Alfit, Abdillah, Saronono.
- Ø Rekan-rekan mahasiswa di Jurusan Fisika.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Alloh SWT, berkat karunia dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan tingkat sarjana strata satu Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Terselesaikannya skripsi ini tentu tidak terlepas dari bantuan banyak pihak. Untuk itu penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Ir. Ari Handono Ramelan, M.Sc, Ph.D selaku Pembimbing I atas perhatian dan kesabarannya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Nuryani, M.Si selaku pembimbing II atas perhatian dan kesabarannya serta telah meluangkan waktunya untuk membina dan memberikan bimbingan kepada penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
3. Artono Dwijo Sutomo, M.Si dan Agus Supriyanto, M.Si atas segala saran dan kritikan demi kesempurnaan skripsi ini.
4. Drs. Suharyana, MSc. PhD selaku pembimbing akademik yang selama ini terus memberikan dukungan atas langkah yang saya tempuh.
5. Bapak, Ibu, dan kakakku yang selalu memberikan nasihat, dorongan, dan dukungan selama ini.
6. Seluruh Civitas Laboratorium Instrumentasi dan elektronika (Lab Instel) FMIPA UNS. Mas David yang selalu membantu dan tak kenal lelah, Doni, Tunjung, Nanang, Danu, Arifin, Supriyadi dll yang selalu menghangatkan suasana instel.

7. Seluruh laboran di Sub. Lab. Fisika Laboratorium Pusat Universitas Sebelas Maret Surakarta. Mas Ari yang baik hati, Mas Eko yang lucu, Mas Moel yang ramah, Mas Johan yang santai, dan Mas Sri yang cool.
8. Teman-teman di Fisika angkatan 2000. Doni (makasih atas bantuan dan dorongannya), Iwan (Makasih telah menjadi moderator seminar), Ismaryanto, Sriyadi, Marsudi, Failasuf, Sigit, Agus, Arwin, Irma, Ninik, Sihyani, fitri, Intan, Harni, Ani, Arum, dan lainnya (maaf tidak saya sebutkan semuanya). Perpisahan bukanlah segalanya.
9. Semua adik angkatan baik 2001, 2002, dan 2003. Dipundak kalianlah sekarang perjuangan untuk memajukan Fisika.
10. Dan semua pihak yang tidak mungkin dapat saya sebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa karya tulis ini masih jauh dari sempurna, maka saran dan kritik yang bersifat membangun sangat penulis harapkan.

Akhirnya semoga karya tulis ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan dapat memberikan sumbangan pada perkembangan ilmu pengetahuan.

Surakarta, Februari 2005

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Halaman Pernyataan Keaslian Skripsi	ii
Halaman Pengesahan	iii
Moto	iv
Persembahan	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi.....	viii
Daftar Gambar.....	x
Daftar Tabel	xi
Daftar Lampiran	xii
Intisari	xiii
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Hasil Penelitian	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II. LANDASAN TEORI	
2.1. Energi dan Daya	5
2.2. Sel Surya.....	6
2.3. Karakteristik Sel Surya.....	9
2.4. Radiasi Harian Matahari pada Permukaan Bumi	11
2.5. Pengaruh Sudut Datang terhadap Radiasi yang diterima	12
2.6. Mikrokontroler 89C51.....	13
2.6.1. Register Fungsi Khusus.....	14
2.6.2. Timer	15
2.6.3. Mengatur <i>Timer</i>	18
2.7. Motor Steper.....	19
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Waktu dan tempat penelitian	22
3.2. Alat dan Bahan	22
3.2.1. Alat	22
3.2.2. Bahan	23
3.3. Rancangan Alat	23
3.4. Metode Penelitian.....	24
3.5. Prosedur Penelitian.....	24
3.5.1. Pengujian pengaruh sudut datang terhadap output sel surya....	25
3.5.2. Pengambilan data posisi/sudut matahari	27
3.5.3. Penyamaan skala Amperemeter dan Voltmeter	27
3.5.4. Pengujian karakteristik panel sel surya	28
3.5.5. Pengujian keluaran sel surya	29
3.5.6. Pengujian mikrokontroler.....	29
3.5.7. Pembuatan sistem pelacak.....	30

3.5.7.1. Pembuatan <i>Hardware</i>	30
3.5.7.2. Pembuatan <i>software</i>	33
3.5.8. Pengambilan Data	36
BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil Pengujian Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) Panel Sel Surya	38
4.2. Hasil Pengujian <i>Timer</i>	39
4.3. Pengujian Derajat Pergerakan Panel Sel Surya	40
4.4. Keluaran panel sel surya.....	41
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan.....	48
5.2. Saran	48
Daftar Pustaka	49
Lampiran	

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1	Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik pada panel sel surya 6
Gambar 2.2	Struktur pita sebuah semikonduktor..... 7
Gambar 2.3	Tingkat energi yang dihasilkan oleh sambungan p-n semikonduktor..... 7
Gambar 2.4	Grafik arus terhadap tegangan dan daya terhadap tegangan sebagai karakteristik sel surya 10
Gambar 2.5	Radiasi sorotan dan radiasi sebaran yang mengenai permukaan bumi..... 11
Gambar 2.6	Grafik besar radiasi harian matahari yang mengenai permukaan bumi..... 12
Gambar 2.7	Arah sinar datang membentuk sudut terhadap normal bidang panel 13
Gambar 2.8	<i>Timer</i> pencacah biner mode 0 16
Gambar 2.9	<i>Timer</i> pencacah biner mode 1 16
Gambar 2.10	<i>Timer</i> pencacah biner mode 2 17
Gambar 2.11	<i>Timer</i> pencacah biner mode 3 18
Gambar 2.12	Denah susunan bit dalam registr TMOD 19
Gambar 2.13	Ilustrasi motor stepper dengan 4 kelompok koil 21
Gambar 3.1	Skema rancangan alat penelitian sistem pelacak panel sel surya.... 23
Gambar 3.2	Diagram blok langkah-langkah penelitian 25
Gambar 3.3a	Arah sinar tegak lurus panel..... 26
Gambar 3.3b	Arah sinar membentuk sudut tertentu 26
Gambar 3.4	Skema penyamaan skala pada voltmeter..... 27
Gambar 3.5	Skema penyamaan skala pada ampermeter..... 28
Gambar 3.6	Rangkaian pengujian karakteristik sel surya..... 29
Gambar 3.7	Sistem hardware alat pelacak panel sel surya 31
Gambar 3.8	Susunan optimalisasi panel sel surya secara keseluruhan..... 32
Gambar 3.9	Diagram alir program utama 33
Gambar 3.10	Diagram alir Rutin Steper 35
Gambar 3.11	Diagram alir Rutin Jeda 36
Gambar 3.12	Rangkaian pengukuran keluaran panel sel surya 37
Gambar 4.1	Grafik arus-tegangan hasil pengujian karakteristik sel surya 38
Gambar 4.2	Grafik pengujian <i>timer</i> mikrokontroler AT89C51 40
Gambar 4.3	Grafik pengujian drajat pergerakan panel tiap 5 menit..... 41
Gambar 4.4	Grafik keluaran panel sel surya pengukuran I..... 42
Gambar 4.5	Grafik keluaran panel sel surya pengukuran II 42
Gambar 4.6	Grafik keluaran panel sel surya dengan interpolasi pengukuran I.. 44
Gambar 4.7	Grafik keluaran panel sel surya dengan interpolasi pengukuran II. 45
Gambar 4.8	Grafik perbandingan antara hasil pengukuran I dengan teori 46
Gambar 4.9	Grafik perbandingan antara hasil pengukuran II dengan teori..... 47

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Ilustrasi putaran motor stepper 4 koil pembangkit tunggal 17
Tabel 2.2	Ilustrasi putaran motor stepper 4 koil pembangkit ganda 17

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Pengaruh posisi matahari terhadap keluaran panel sel surya
Lampiran 2	Hasil pengujian karakteristik panel sel surya
Lampiran 3	Hasil pengujian keluaran panel sel surya
Lampiran 4	Uji Port C Mikrokontroler
Lampiran 5	Hasil pengujian <i>timer</i>
Lampiran 6	Hasil pengujian sudut pergerakan panel sel surya
Lampiran 7	Hasil pengukuran keluaran panel sel surya
Lampiran 8	Perhitungan Energi yang digunakan sistem pelacak
Lampiran 9	Perhitungan efisiensi panel sel surya

INTISARI

Optimalisasi Panel Sel Surya dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler AT89C51

Oleh
Budi Yuwono

M0200002

Dalam penelitian ini telah dibuat sistem pelacak panel sel surya. Kerja sistem ini adalah mengendalikan arah panel sel surya agar tegak lurus dengan arah datang sinar matahari. Inti dari alat ini adalah sebuah *chip* mikrokontroler AT89C51 yang merupakan keluarga MCS-51 intel. *Timer* mode 1 pada mikrokontroler AT89C51 mengatur putaran motor stepper untuk menggerakkan panel agar sesuai dengan arah pergerakan matahari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel sel surya menggunakan sistem pelacak menghasilkan energi keluaran lebih besar daripada panel sel surya diam. Peningkatan energi keluaran pada pengukuran I adalah sebesar 15,0% dan pada pengukuran II adalah sebesar 15,4%.

Kata kunci: Sistem Pelacak, Mikrokontroler AT89C51, *Timer*

ABSTRACT

The Making of Solar Cell Panel Tracking System on the Basis of Microcontroller AT89C51

**By
Budi Yuwono**

M0200002

In this research tracking system of solar cell panel has been made. The work of this system is to control the direction of the solar cell panel always facing perpendicular to the solar radiations. The system was made using an AT89C51 Microcontroller chip (family MCS-51 Intel). *Timer* mode 1 on AT89C51 microcontroller manages the motor stepper rotation of the panel suitable with the solar direction movement.

The result of this research shows that the solar panel with tracking system generates the higher output than that of the static solar cell panel. The increasing output on the measurement I is 15.0% and measurement II is 15.4 %.

Keywords: Tracking system, Microcontroller AT89C51, Timer.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Masalah energi tampaknya akan tetap menjadi topik penelitian yang menarik sepanjang peradaban umat manusia. Upaya mencari sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar fosil masih tetap ramai dibicarakan. Terdapat beberapa sumber energi alam yang tersedia sebagai energi alternatif yang bersih, tidak berpolusi, aman dan dengan persediaan yang tidak terbatas (Wilson, 1996) diantaranya adalah energi surya. Pada masa yang akan datang, dengan adanya kebutuhan energi yang makin besar, penggunaan sumber energi listrik yang beragam tampaknya tidak bisa dihindari. Oleh sebab itu, pengkajian terhadap berbagai sumber energi baru tidak akan pernah menjadi langkah yang sia-sia. Teknologi fotovoltaik yang mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan divais semikonduktor yang disebut sel surya (Fishbane et.al, 1996) banyak dikaji oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Di sisi lain panel sel surya buatan pabrik juga sudah tersedia.

Permasalahannya saat ini adalah bagaimana menggunakan panel sel surya untuk mendapatkan keluaran listrik yang optimal. Pemakaian panel sel surya umumnya diletakkan dengan posisi tertentu dengan tanpa perubahan (Pruit, 2001), sebagai contoh panel sel surya dihadapkan ke atas. Dengan posisi panel menghadap ke atas dan jika panel dianggap benda yang mempunyai permukaan rata maka panel akan mendapat radiasi matahari maksimum pada saat matahari tegak lurus dengan

bidang panel. Pada saat arah matahari tidak tegak lurus dengan bidang panel atau membentuk sudut q maka panel akan menerima radiasi lebih kecil dengan faktor $\cos q$. Dengan menurunnya radiasi yang diterima oleh panel maka jelas akan mengurangi energi listrik yang dikeluarkan oleh panel. Bahkan berkurangnya energi ini bisa menjadi setengahnya jika $q = 60^\circ$. Untuk itu perlu adanya pengaturan arah panel sel surya agar selalu tegak lurus dengan arah sinar matahari. Pengaturan arah panel sel surya kurang efektif jika dilakukan secara manual oleh manusia. Dengan demikian perlu dibuat sebuah sistem kontrol yang dapat mengatur arah panel sel surya tersebut.

Suatu sistem kontrol memerlukan mekanisme pengolah algoritma. Pengolahan algoritma sistem kontrol bisa diselesaikan dengan komputer, mikrokontroler, dan alat lain. Pengolah algoritma yang berkembang pesat saat ini adalah mikrokontroler. Mikrokontroler merupakan suatu terobosan teknologi mikroprosesor dan mikrokomputer yang hanya membutuhkan ruang kecil serta dapat diproduksi secara masal, sehingga harganya menjadi lebih murah dibandingkan mikroprosesor (Agfianto, 2004). Dengan bentuk yang kecil tersebut memungkinkan mikrokontroler untuk dipasang langsung pada peralatan-peralatan yang akan dikontrol seperti: kontrol alat-alat produksi, mesin pengerjaan logam, mesin ATM, mesin fotocopy, sistem kendaraan, peralatan medis, dan lain-lain (Tocci, 2004). Aplikasi mikrokontroler secara umum adalah untuk mengoptimalkan kerja alat-alat atau sistem yang dikontrol.

Meninjau hal di atas penulis berupaya untuk membuat rancangan alat yang dapat mengatur arah panel terhadap matahari dengan basis mikrokontroler untuk mendapatkan keluaran energi panel sel surya yang optimal.

1.2. Perumusan masalah

Dengan dasar pemikiran di atas maka pada penelitian ini akan dibuat suatu rancangan alat yang dapat mengatur posisi panel terhadap matahari yang disebut dengan sistem pelacak (*tracking system*) sehingga panel mengeluarkan energi yang optimal. Rancangan alat yang akan dibuat adalah sistem kontrol terbuka dengan basis mikrokontroler. Dipilihnya sistem mikrokontroler ini karena sistem mikrokontroler merupakan sistem yang handal, membutuhkan biaya yang murah dan bisa dirancang untuk alat yang *portable*.

1.3. Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini sistem pelacak panel sel surya memiliki dua derajat kebebasan dan diset untuk pengukuran selama satu hari. Sistem pelacak ini menggerakkan panel berdasarkan perubahan posisi matahari. Panel sel surya yang digunakan adalah modul berukuran $126\text{ mm} \times 104\text{ mm}$. Pengaruh suhu panel surya terhadap keluaran arus dan tegangan tidak dikaji.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengoptimalkan panel sel surya untuk mendapatkan energi maksimal menggunakan sistem pelacak dengan mengatur posisi terhadap matahari dengan basis mikrokontroler.

1.5. Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat dari penelitian yaitu diharapkan bisa meningkatkan energi yang dihasilkan oleh panel sel surya sehingga dapat ikut membantu pemerintah dalam upaya mengatasi masalah energi terutama dalam pencarian dan pengoptimalan energi alternatif.

1.6.Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan skripsi ini meliputi 5 bab. BAB I menjelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan skripsi. BAB II berisi tentang dasar teori yang melandasi dan sebagai acuan dalam penelitian ini antara lain teori tentang daya, energi, sel surya, pengaruh sudut datang, mikrokontroler, dan motor stepper. BAB III berisi metodologi penelitian yang meliputi tempat dan waktu pelaksanaan, alat-alat yang digunakan dalam penelitian serta cara pengujian yang meliputi pengujian pengaruh posisi matahari terhadap keluaran panel sel surya, pengujian karakteristik dan keluaran panel sel suryapembuatan sistem pelacak, pengujian sistem pelacak dan pengujian instrument keseluruhan dari penelitian ini.

BAB IV berisi hasil penelitian yang berisikan hasil pengujian alat-alat, hasil pengukuran keluaran panel sel surya menggunakan sistem pelacak dan panel sel surya pada posisi tetap (tidak bergerak). BAB V berisi kesimpulan dan saran.

BAB II

LANDASAN TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai energi, daya, sel surya, karakteristik sel surya, pengaruh sudut, mikrokontroler dan motor stepper. Sel surya merupakan piranti yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Besarnya intensitas radiasi matahari yang diserap sel surya dipengaruhi oleh sudut datang sinar terhadap panel. Mikrokontroler merupakan piranti pengolah algoritma yang digunakan dalam sistem kontrol ini. Motor stepper adalah piranti untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik sebagai penggerak panel sel surya sesuai dengan logika yang dikirimkan oleh mikrokontroler. Penjelasan lebih rinci tentang energi, daya, sel surya, karakteristik sel surya, pengaruh sudut, mikrokontroler, dan motor stepper akan dipaparkan dalam bab ini.

2.1 Energi dan Daya

Ketika muatan melewati elemen rangkaian maka medan listrik bekerja pada muatan tersebut. Total usaha yang bekerja pada muatan q yang melewati rangkaian elemen sebanding dengan produk q dan beda potensial V . Jika arus adalah I dan selang waktu dt , maka jumlah muatan yang mengalir adalah $dQ = I dt$. Usaha yang bekerja pada muatan ini adalah (Young and Freedman, 1996):

$$dw = VdQ = VIdt \dots\dots\dots (2.1)$$

Usaha ini menunjukkan energi listrik yang ditransfer ke dalam elemen rangkaian. Transfer energi tiap satuan waktu disebut daya yang ditunjukkan dengan

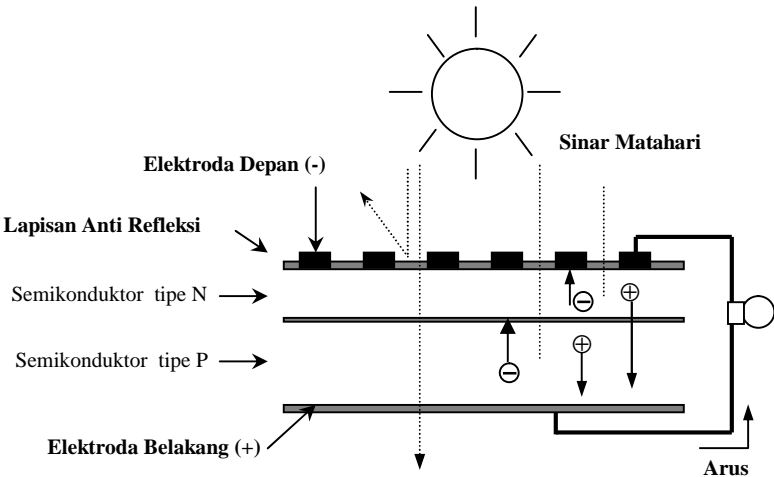
P . Pembagian persamaan 2.1 di atas dengan dt akan didapat kecepatan pengiriman energi pada rangkaian tersebut yaitu:

$$\frac{dw}{dt} = P = VI \dots\dots\dots (2.2)$$

Satuan untuk V adalah volt atau joule per coulomb dan satuan I adalah ampere atau coulomb per sekon, dengan demikian satuan P adalah J/s (watt):

2.2 Sel Surya

Secara sederhana sel surya terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction semiconductor*) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam gambar 2.1.

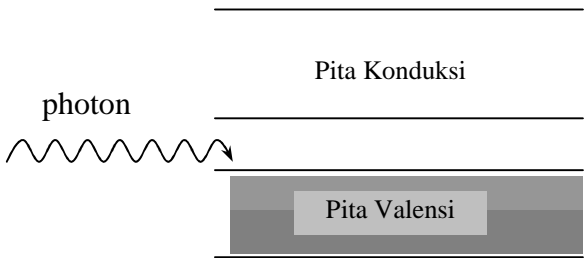


Gambar 2.1 Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik pada sel surya

Bagian utama pengubah energi sinar matahari menjadi listrik adalah penyerap (*absorber*), meskipun demikian masing-masing lapisan juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi dari sel surya. Sinar matahari terdiri dari bermacam-macam jenis

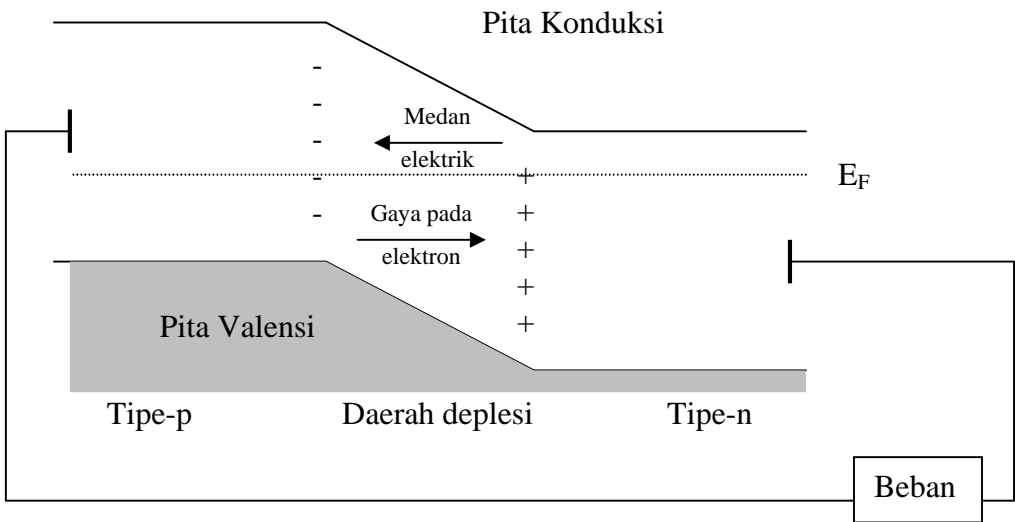
gelombang elektromagnetik, oleh karena itu penyerap disini diharapkan dapat menyerap sebanyak mungkin radiasi sinar yang berasal dari cahaya matahari.

Lebih detail lagi bisa dijelaskan bahwa semikonduktor adalah bahan yang memiliki struktur seperti isolator akan tetapi memiliki celah energi kecil (1 eV atau kurang) sehingga memungkinkan elektron bisa melompat dari pita valensi ke pita konduksi. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan pita-pita energi seperti gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur pita sebuah semikonduktor

Elektron dari pita konduksi dapat meloncat ke pita valensi ketika sambungan tersebut dikenai photon dengan energi tertentu. Tingkat energi yang dihasilkan diperlihatkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tingkat energi yang dihasilkan oleh sambungan p-n semikonduktor

Ketika sinar matahari yang terdiri dari photon-photon jatuh pada permukaan bahan sel surya (*absorber*), akan diserap, dipantulkan, atau dilewatkan begitu saja seperti terlihat pada gambar 2.1, dan hanya foton dengan tingkat energi tertentu yang akan membebaskan elektron dari ikatan atomnya, sehingga mengalir arus listrik. Tingkat energi ini disebut energi *band-gap* yang didefinisikan sebagai sejumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari ikatan kovalennya sehingga terjadilah aliran arus listrik. Elektron dari pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi. Elektron menjadi pembawa n dan meninggalkan hole, pembawa p . Pembawa p akan bergerak menuju persambungan demikian juga pembawa n akan bergerak ke persambungan, perpindahan tersebut menghasilkan beda potensial. Arus dan daya yang dihasilkan fotovoltaiik ini dapat dialirkan ke rangkaian luar. Untuk membebaskan elektron dari ikatan kovalennya, energi foton (hc) harus sedikit lebih besar/diatas daripada energi *band-gap*. Jika energi foton terlalu besar dari pada energi *band-gap*, maka ekstra energi tersebut akan dirubah dalam bentuk panas pada sel surya. Karenanya sangatlah penting pada sel surya untuk mengatur bahan yang dipergunakan, yaitu dengan memodifikasi struktur molekul dari semikonduktor yang dipergunakan.

Agar efisiensi sel surya bisa tinggi maka foton yang berasal dari sinar matahari harus bisa diserap yang sebanyak-banyaknya, kemudian memperkecil refleksi dan rekombinasi serta memperbesar konduktivitas dari bahannya. Agar foton bisa diserap sebanyak-banyaknya, maka penyerap harus memiliki energi *band-gap* dengan jangkauan yang lebar, sehingga memungkinkan untuk bisa menyerap sinar matahari yang mempunyai energi sangat bermacam-macam tersebut. Salah satu bahan yang

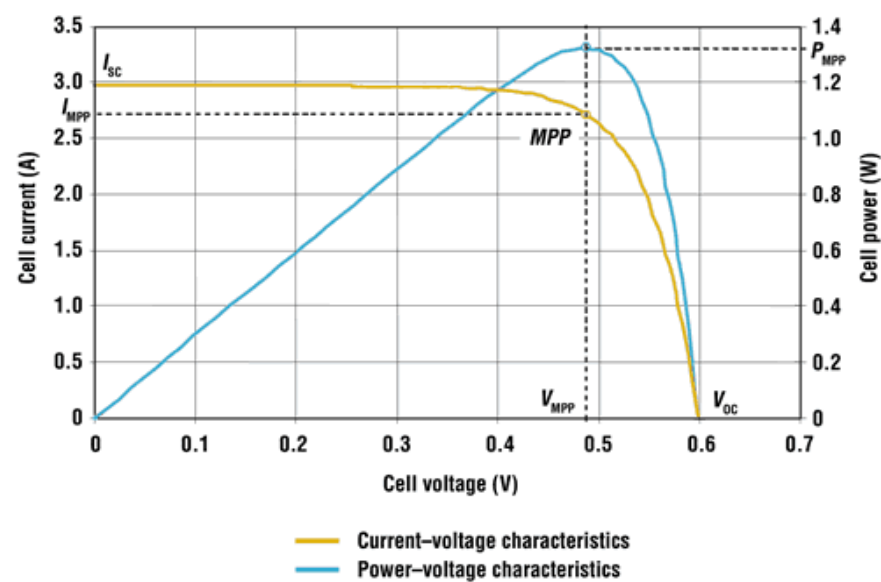
sedang banyak diteliti adalah CuInSe₂ yang dikenal merupakan salah satu dari *direct semiconductor* (Rusminto, 2003).

Untuk mendapatkan keluaran yang besar maka perlu penggabungan dari beberapa sel surya yang disebut dengan modul sel surya. Pada modul, sel surya dihubungkan secara seri atau parallel untuk menghasilkan tegangan, arus, atau daya yang tinggi. Permukaan modul ditutup dengan kaca atau materi transparan lain untuk proteksi terhadap lingkungan (Anonim, 2005).

2.3 Karakteristik Sel Surya

Sel surya menghasilkan arus, dan arus ini beragam tergantung pada tegangan sel surya. Karakteristik tegangan-arus biasanya menunjukkan hubungan tersebut. Ketika tegangan sel surya sama dengan nol atau digambarkan sebagai “sel surya hubung pendek”, “arus rangkaian pendek” atau I_{SC} (*short circuit current*), yang sebanding dengan irradiansi terhadap sel surya dapat diukur. Nilai I_{SC} naik dengan meningkatnya temperatur, meskipun temperatur standar yang tercatat untuk arus rangkaian pendek adalah 25°C. Jika arus sel surya sama dengan nol, sel surya tersebut digambarkan sebagai “rangkaiian terbuka”. Tegangan sel surya kemudian menjadi “tegangan rangkaian terbuka”, V_{oc} (*open circuit voltage*). Ketergantungan V_{oc} terhadap irradiansi bersifat logaritmis, dan penurunan yang lebih cepat disertai peningkatan temperatur melebihi kecepatan kenaikan I_{sc} . Oleh karena itu, daya maksimum sel surya dan efisiensi sel surya menurun dengan peningkatan temperatur. Pada kebanyakan sel surya, peningkatan temperatur dari 25°C mengakibatkan penurunan daya sekitar 10%.

Sel surya menghasilkan daya maksimumnya pada tegangan tertentu. Gambar 2.4 menunjukkan tegangan arus dan karakteristik tegangan-daya. Gambar ini juga menunjukkan dengan jelas bahwa kurva daya memiliki titik daya maksimum yang disebut MPP (*Maximum Power Point*).



Gambar 2.4 Grafik arus terhadap tegangan dan daya terhadap tegangan sebagai karakteristik sel surya (Quashcning, 2004).

Tegangan titik daya maksimum atau V_{MPP} biasanya kurang dari tegangan rangkaian terbuka dan arusnya, I_{MPP} lebih rendah dibandingkan dengan arus rangkaian pendek. Pada titik daya maksimum (MPP), arus dan tegangan memiliki hubungan yang sama dengan irradiansi dan temperatur sebagaimana arus rangkaian pendek dan tegangan rangkaian terbuka.

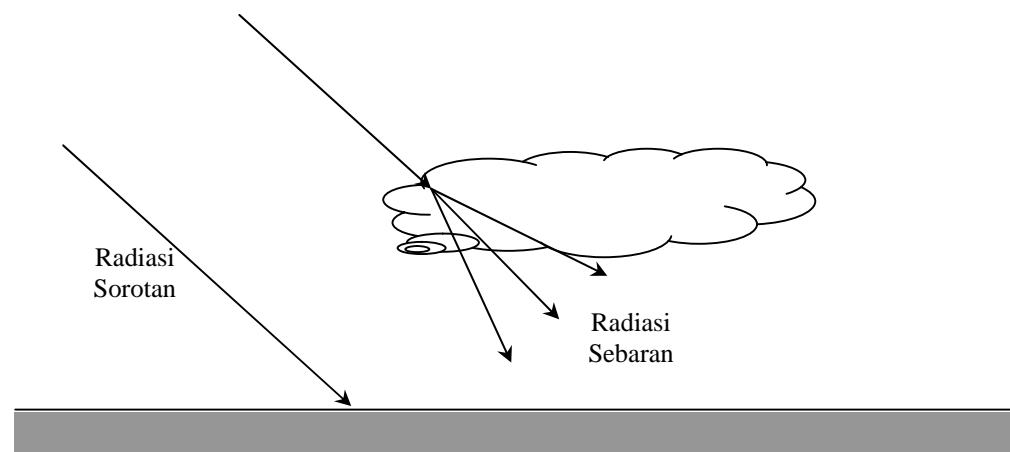
Efisiensi sel surya (h) adalah perbandingan antara daya listrik maksimum sel surya dengan daya pancaran (*radiant*) pada bidang sel surya.

$$h = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{(Intensitas\ cahaya)(luas\ Panel)} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

Sel surya kristal yang dijual pada saat ini bisa mencapai efisiensi sampai 20%, namun di laboratorium, efisiensi 25% bisa dicapai (Quashning, 2004).

2.4 Radiasi Harian Matahari pada Permukaan Bumi

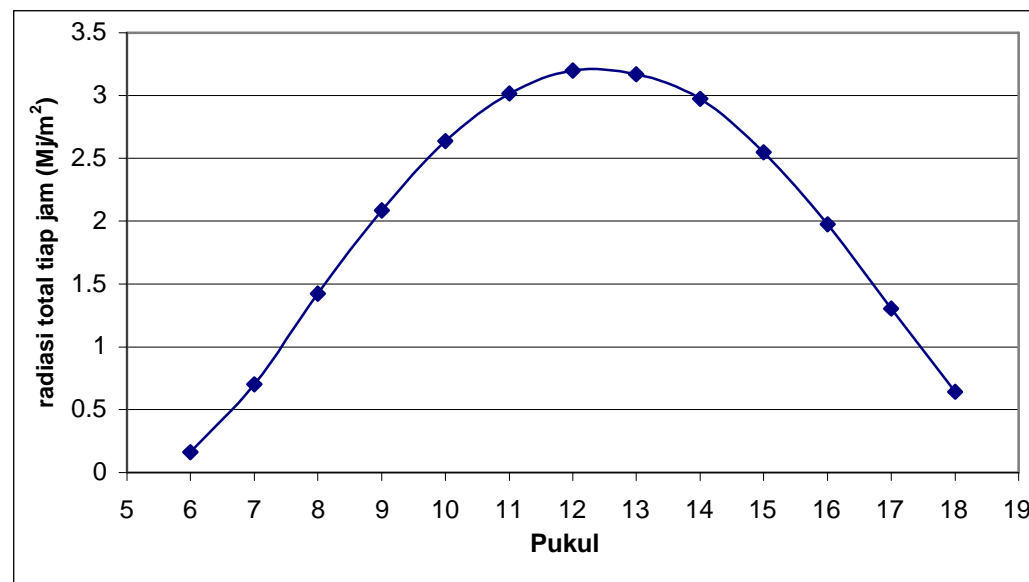
Radiasi matahari yang tersedia di luar atmosfer bumi atau sering disebut konstanta radiasi matahari sebesar 1353 W/m^2 dikurangi intensitasnya oleh penyerapan dan pemantulan oleh atmosfer sebelum mencapai permukaan bumi. Ozon di atmosfer menyerap radiasi dengan panjang-gelombang pendek (ultraviolet) sedangkan karbon dioksida dan uap air menyerap sebagian radiasi dengan panjang-gelombang yang lebih panjang (inframerah). Selain pengurangan radiasi bumi yang langsung atau sorotan oleh penyerapan tersebut, masih ada radiasi yang dipencarkan oleh molekul-molekul gas, debu, dan uap air dalam atmosfer sebelum mencapai bumi yang disebut sebagai radiasi sebaran seperti terlihat pada gambar 2.5 (Jansen, 1995).



Gambar 2.5 Radiasi sorotan dan radiasi sebaran yang mengenai permukaan bumi

Dengan adanya faktor-faktor diatas menyebabkan radiasi yang diterima permukaan bumi memiliki intensitas yang berbeda-beda setiap saat. Besarnya radiasi

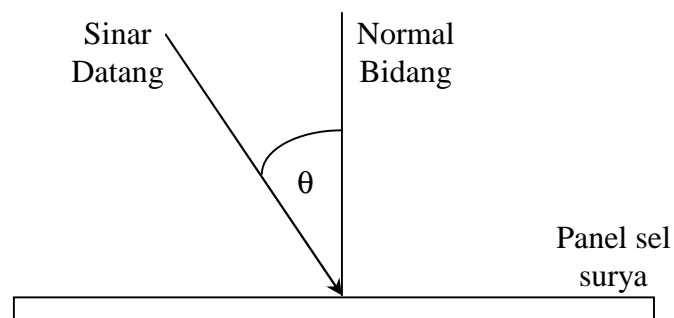
harian yang diterima permukaan bumi ditunjukkan pada grafik gambar 2.6. Pada waktu pagi dan sore radiasi yang sampai permukaan bumi intensitasnya kecil. Hal ini disebabkan arah sinar matahari tidak tegak lurus dengan permukaan bumi (membentuk sudut tertentu) sehingga sinar matahari mengalami peristiwa difusi oleh atmosfer bumi.



Gambar 2.6 Grafik besar radiasi harian matahari yang mengenai permukaan bumi (Jansen, 1995)

2.5 Pengaruh Sudut Datang terhadap Radiasi yang diterima

Besarnya radiasi yang diterima panel sel surya dipengaruhi oleh sudut datang (*angle of incidence*) yaitu sudut antara arah sinar datang dengan komponen tegak lurus bidang panel.



Gambar 2.7 Arah sinar datang membentuk sudut terhadap normal bidang panel sel surya

Panel akan mendapat radiasi matahari maksimum pada saat matahari tegak lurus dengan bidang panel. Pada saat arah matahari tidak tegak lurus dengan bidang panel atau membentuk sudut q seperti gambar 2.7 maka panel akan menerima radiasi lebih kecil dengan faktor $\cos q$ (Jansen, 1995).

$$I_r = I_{r_0} \cos q \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana I_r : Radiasi yang diserap panel

I_{r_0} : Radiasi yang mengenai panel

θ : Sudut antara sinar datang dengan normal bidang panel

2.6 Mikrokontroler AT89C51

Mikrokontroler AT89C51 merupakan mikrokomputer CMOS 8 bit keluarga MCS-51 intel. Mikrokontroler ini memerlukan 3 kapasitor, 1 resistor, 1 kristal, serta catu daya 5 volt. Rangkaian *reset* dibentuk dari resistor dan kapasitor sehingga dalam keadaan power on *reset* maka mikrokontroler akan direset ketika mendapatkan catu daya. Mikrokontroler AT89C51 memiliki keunggulan-keunggulan sebagai berikut (Anonim, 2004):

- a. Sesuai untuk produk-produk MCS-51
- b. Empat Kbyte Sistem *Reprogrammable Flash Memory*

- c. Operasi *static* penuh : 0 Hz - 24MHz
- d. RAM *internal* 128x8 bit
- e. Tiga puluh dua *programmable* jalur I/O
- f. *Timer/counter* 2x16 bit
- g. Enam sumber *interrupt*
- h. Saluran serial yang dapat diprogram
- i. *Mode low power idle* dan *power down*.

2.6.1. Register Fungsi Khusus

Mikrokontroler AT89C51 memiliki *register* fungsi khusus yang diperlukan dalam pengolahan-pengolahan algoritma. *Register* tersebut adalah:

- a. *Register n (rn)*

Pengalamatan register menggunakan r0,r1,r2,r3,r4,r5,r6 atau r7

- b. Akumulator (A)

Akumulator adalah *register* yang berfungsi untuk menampung hasil-hasil pengolahan data dari instruksi-instruksi mikrokontroler. Akumulator dapat menampung data 8 bit.

- c. *Register B (B)*

Register B merupakan *register* 8 bit yang digunakan dalam operasi perkalian dan pembagian. Pada instruksi-instruksi lain berfungsi sebagai *register* biasa.

- d. *Data Pointer (DPTR)*

Data pointer digunakan untuk mengakses kode eksternal atau data memori.

e. *Register Timer*

Register timer adalah *register* 16 bit yang digunakan dalam proses penghitungan *timer/counter*. *Register* untuk *register timer* 0 adalah TH0 dan TL0 sedangkan untuk *timer* 1 adalah TH 1 dan TL1. operasi *timer* diatur oleh *register* TMOD dan TCON.

2.6.2. Timer

Keluarga mikrokontroler AT89C51 dilengkapi dengan dua perangkat *timer* yaitu *timer* 0 dan *timer* 1.

Perangkat *timer* tersebut merupakan perangkat keras yang terpadu dalam mikrokontroler AT89C51, untuk mengaksesnya diperlukan *register* khusus yang tersimpan dalam SFR (*special function register*). Pencacah biner *timer* 0 diakses melalui *register* TL0 (*Timer 0 low byte*, memori data internal alamat 6Ah) dan *register* TH0 (*Timer 0 high byte*, memori data internal alamat 6Ch). Pencacah biner *timer* 1 diakses melalui *register* TL1 (*Timer 1 low byte*, memori data internal alamat 6Bh) dan *register* TH1 (*Timer 1 high byte*, memori data internal alamat 6Dh).

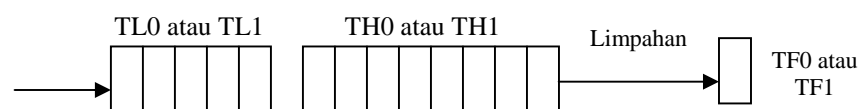
Pencacah biner *timer* AT98C51 merupakan pencacah biner 16 bit naik (*count up binary counter*) yang mencacah dari 0000h sampai FFFFh, saat kondisi pencacah berubah dari FFFFh kembali ke 0000h akan timbul sinyal limpahan (*over flow*).

Untuk mengatur kerja *timer* tersebut digunakan dua *register* tambahan yang dipakai bersama oleh *timer* 0 dan *timer* 1. *Register* tambahan tersebut adalah *register* TCON (*Timer Control Register*, memori data internal alamat 88h) dan *register* TMOD (*Timer Mode Register*, memori data internal alamat 89h) (Scott, 1995).

Timer 0 dan timer 1 mempunyai 4 mode operasi yang dapat dipilih yaitu (Agfiyanto, 2004):

a. Mode 0 (Pencacah Biner 13 bit)

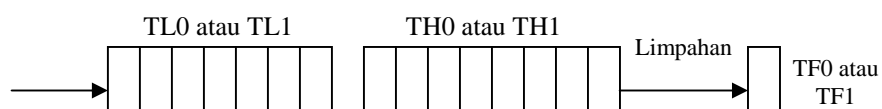
Pencacah biner dibentuk dengan TLx (bisa TL0 atau TL1) sebagai pencacah biner 5 bit (meskipun kapasitas sesungguhnya 8 bit), limpahan dari pencacah biner 5 bit ini dihubungkan ke THx (TH0 atau TH1) membentuk sebuah untai pencacah biner 13 bit seperti gambar 2.8. Limpahan dari pencacah 13 bit ini ditampung di TFx (TF0 atau TF1) yang berada di dalam register TCON.



Gambar 2.8 Timer pencacah biner mode 0

b. Mode 1 (Pencacah Biner 16 bit)

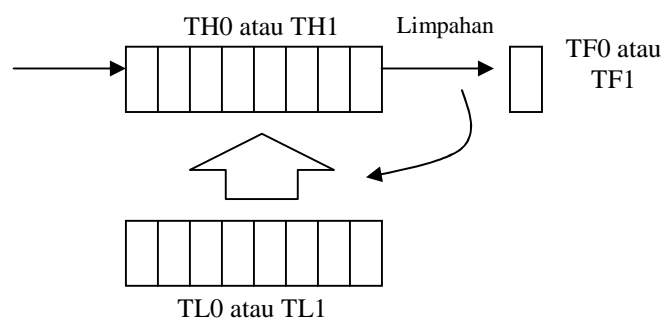
Mode ini sama dengan mode 0, hanya saja register TLx dipakai sepenuhnya sebagai pencacah biner 8 bit, sehingga kapasitas pencacah biner yang terbentuk adalah 16 bit seperti gambar 2.9. Seiring dengan sinyal detak, kedudukan pencacah biner 16 bit ini akan bergerak dari 0000h, 0001h, ..., FFFFh, kemudian kembali menjadi 0000h, pada saat tersebut terjadi sinyal limpahan atau *overflow* pada bit TFx).



Gambar 2.9 Timer pencacah biner mode 1

c. Mode 2 (Pencacah Biner 8 bit dengan Isi Ulang)

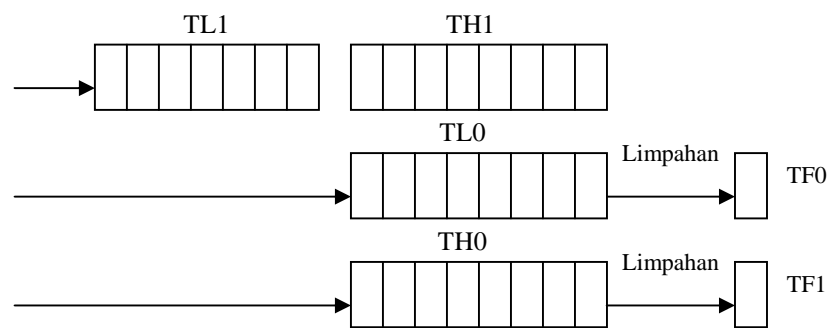
Pada timer mode 2 TLx dipakai sebagai pencacah biner 8 bit, sedangkan THx dipakai untuk menyimpan nilai yang diisi ulang ke TLx setiap kali terjadi limpahan (berubah dari FFh menjadi 00h) seperti di tunjukkan pada gambar 2.10. Dengan cara ini bisa didapatkan sinyal limpahan yang frekuensinya ditentukan oleh nilai yang tersimpan dalam TH0.



Gambar 2.10 Timer pencacah biner mode 2

d. Mode 3 (Gabungan Pencacah Biner 16 bit dan 8 bit)

Pada mode 3 TL0, TH0, TH1, dan TL1 dipakai untuk membentuk 3 untaian pencacah, yang pertama adalah untaian pencacah biner 16 bit tanpa fasilitas pemantau sinyal limpahan yang dibentuk oleh TL1 dan TH1. Yang kedua adalah TL0 yang dipakai sebagai pencacah biner 8 bit dengan TF0 sebagai sarana pemantau limpahan. Pencacah biner ketiga adalah TH0 yang dipakai sebagai pencacah biner 8 bit dengan TF1 sebagai sarana pemantau limpahan seperti ditunjukkan gambar 2.11 (Hantoro, 2002).



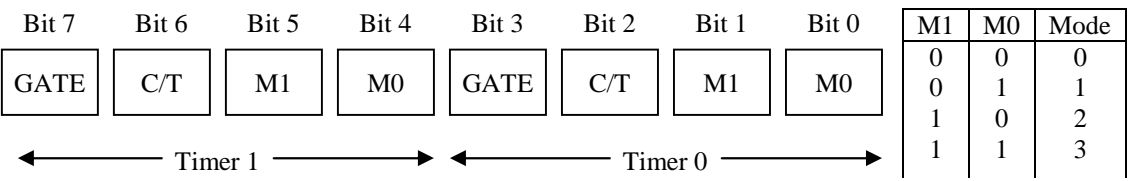
Gambar 2.11 Timer pencacah biner mode 3

2.6.3. Mengatur *Timer*

Register TMOD dan register TCON merupakan register pembantu untuk mengatur kerja *Timer 0* dan *Timer 1*, kedua register ini dipakai bersama oleh *Timer 0* dan *Timer 1*.

Register TMOD dibagi menjadi 2 bagian secara simetris, bit 0 sampai 3 register TMOD (TMOD bit 0-TMOD bit 3) dipakai untuk mengatur *Timer 0*, bit 4 sampai 7 register TMOD (TMOD bit 4-TMOD bit 7) dipakai untuk mengatur *Timer 1*, pemakaiannya sebagai berikut :

1. Bit M0/M1 dipakai untuk menentukan Mode Timer seperti yang terlihat dalam Tabel di Gambar 2.12.
2. Bit C/T* dipakai untuk mengatur sumber sinyal detak yang diumpankan ke pencacah biner. Jika C/T*=0 sinyal detak diperoleh dari osilator kristal yang frekuensinya sudah dibagi 12, jika C/T*=1 maka sinyal detak diperoleh dari kaki T0 (untuk *Timer 0*) atau kaki T1 (untuk *Timer 1*).
3. bit GATE merupakan bit pengatur saluran sinyal detak. Bila bit GATE=0 saluran sinyal detak hanya diatur oleh bit TRx (maksudnya adalah TR0 atau TR1 pada register TCON). Bila bit GATE=1 kaki INT0 (untuk *Timer 0*) atau kaki INT1 (untuk *Timer 1*) dipakai juga untuk mengatur saluran sinyal detak.



Gambar 2.12 Denah susunan bit dalam register TMOD

2.7 Motor Steper

Motor stepper dalam sistem pelacak digunakan sebagai penggerak panel. Dalam motor penggerak listrik dikenal dua macam motor penggerak yaitu motor DC/AC dan motor stepper. Motor DC/AC terdiri dari 2 buah koil sebagai stator dan inti magnet yang bisa berputar pada sumbunya sebagai rotor. Karenanya putaran motor DC/AC ini putaran yang kontinyu.

Penjelasan motor stepper menurut Dwi Sutadi (2003) dalam motor stepper terdapat 4 koil stator yang disusun dengan posisi tertentu sehingga tidak bisa menghasilkan putaran yang kontinyu. Inti magnet akan berhenti berputar jika stator memberikan magnet yang berlawanan dengan inti magnet tersebut, karena keduanya tarik menarik. Jika arus listrik dialirkan ke koil 1 maka inti magnet akan berhadapan dengan koil 1, kemudian jika arus listrik digeser ke koil 2 maka inti magnet akan berhadapan dengan koil 2, dan demikian seterusnya. Inti magnet juga dapat berhenti berputar pada posisi antara dua koil stator dengan cara memberikan arus listrik pada dua koil secara bersamaan. Ini bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan sudut putar yang lebih kecil, dan putaran motor menjadi lebih halus.

Berikut adalah ilustrasi gerakan motor stepper dengan 4 koil yang berseberangan. Putaran dimulai dengan koil 1 berarus listrik, kemudian koil 2 dan seterusnya. Dengan susunan koil seperti ilustrasi diatas maka akan dihasilkan putaran

motor stepper yang searah dengan arah jarum. jam untuk lebih jelas dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Ilustrasi putaran motor stepper 4 koil pembangkit tunggal

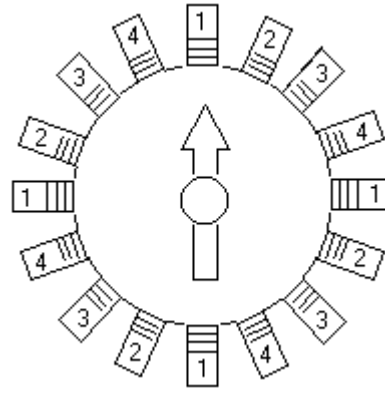
Step	1	2	3	4
Koil 1	On	Off	Off	Off
Koil 2	Off	On	Off	Off
Koil 3	Off	Off	On	Off
Koil 4	Off	Off	Off	On

Dalam urutan diatas, karena inti magnet hanya mengarah ke satu koil yang dialiri arus listrik maka urutan di atas dikenal dengan pembangkitan koil tunggal. Jika dua koil diberi arus listrik secara bersamaan , maka inti magnet akan berada di tengah atau diantara kedua koil yang dialiri listrik. Yang kedua ini disebut dengan pembangkit dua koil dan ilustrasinya seperti pada table 2.2.

Tabel 2.2 Ilustrasi putaran motor stepper 4 koil pembangkit ganda

Step	1	2	3	4
Koil 1	On	On	Off	Off
Koil 2	Off	On	On	Off
Koil 3	Off	Off	On	On
Koil 4	On	Off	Off	On

Untuk mendapatkan putaran yang halus maka kedua cara diatas digabungkan. Dengan cara ini, sudut putar yang diperoleh setiap 1 langkah (step) akan lebih kecil.



Gambar 2.13 Ilustrasi motor stepper dengan 4 kelompok koil

Dalam praktek, koil disusun sedemikian rupa sehingga dalam satu unit motor stepper terdapat beberapa kelompok koil. Gambar 2.13 menunjukkan ilustrasi motor stepper dengan 4 kelompok koil. Setiap koil dengan nomor yang sama dihubungkan dengan kabel yang sama, dan kemudian kabel ini dihubungkan keluar untuk mendapatkan catu daya, sehingga dalam motor stepper didapat 5 kabel yaitu 4 kabel penghubung ke koil dan 1 kabel ground. karena inti magnet dari motor stepper tidak berputar kontinyu dan hanya akan berpindah dari menghadap koil 1 ke koil lainnya, maka yang harus dilakukan untuk memutar motor stepper adalah dengan menggeser sumber arus listrik yang dimasukkan ke koil secara berurutan dari koil 1 ke koil 2, dan seterusnya. Jika dikehendaki putaran dengan arah yang berlawanan maka urutan arus yang dimasukkan ke koil harus digeser berlawanan dari cara yang disebutkan diatas. Untuk keperluan tersebut maka kita memerlukan sebuah piranti penggeser pulsa.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini meliputi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, rancangan alat, metode penelitian, dan prosedur penelitian. Pada prosedur penelitian akan dilakukan beberapa langkah yaitu pengujian untuk mengetahui pengaruh sudut datang, pengambilan data posisi matahari, penyamaan skala alat ukur, pengujian karakteristik sel surya, pengujian keluaran panel sel surya, dan pembuatan alat pelacak. Penjelasan lebih rinci tentang metodologi penelitian akan dipaparkan sebagai berikut:

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Instrumentasi dan Elektronika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta mulai tanggal 28 Februari 2004 sampai 25 oktober 2004.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

Peralatan dan komponen elektronika yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Komputer pribadi
- b. Minimum System Mikrokontroler AT89C51
- c. Modul Sel Surya Ogawa Seiki OSK 5611 126 mm x 104 mm
- d. busur derajat
- e. Stop Watch

- f. Voltmeter
- g. Amperemeter
- h. Transformator 9 volt 0,5 amper
- i. Motor stepper

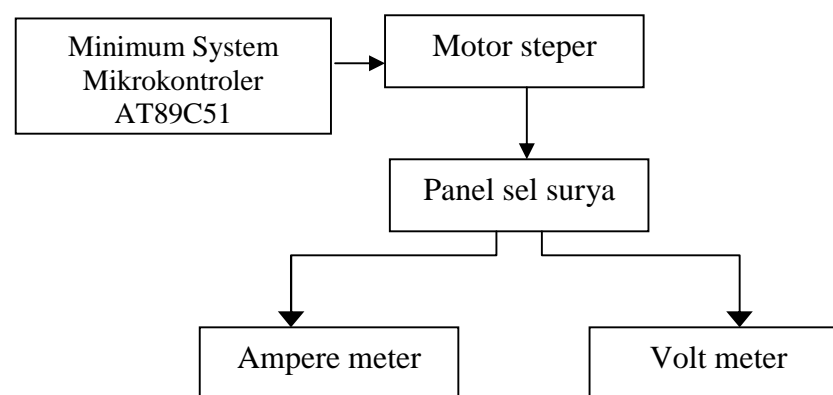
3.2.2. Bahan

Bahan-bahan yang diperlukan antara lain

- a. Mika Akrilik
- b. Mur dan baut ukuran 5 cm
- c. Aluminium siku

3.3 Rancangan Alat

Rancangan alat sistem pelacak panel sel surya bisa digambarkan seperti gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Skema rancangan alat sistem pelacak panel sel surya

Komputer pribadi digunakan untuk membuat program yang kemudian di *download* ke mikrokontroler kemudian mikrokontroler mengirimkan sinyal kepada motor stepper untuk menggerakkan panel sel surya sesuai program yang dibuat.

Dengan adanya sinar matahari yang mengenai panel sel surya maka panel sel surya menghasilkan keluaran yang kemudian diukur dengan voltmeter dan ampermeter.

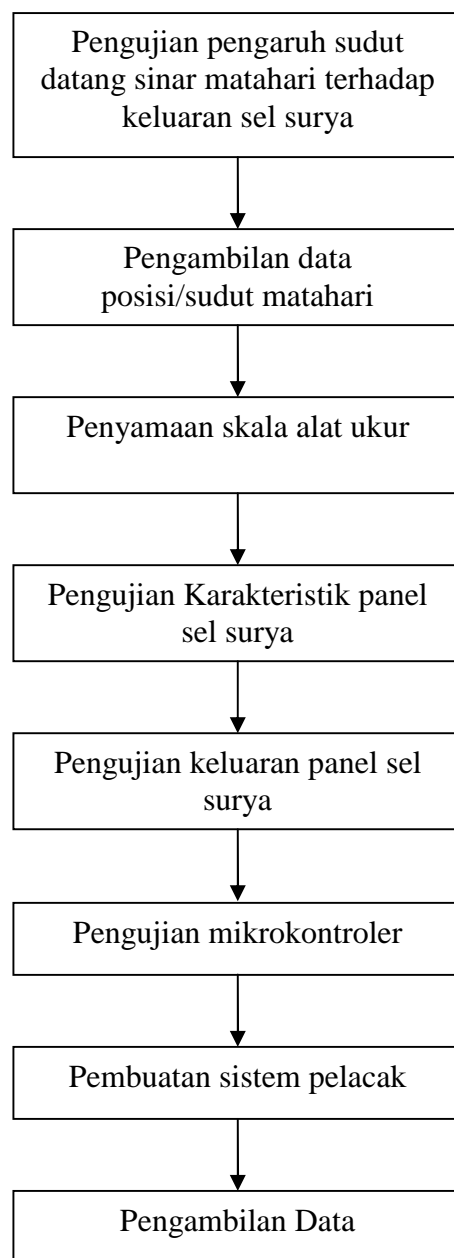
3.4 Metode Penelitian

Metode penelitian meliputi: pengujian pengaruh posisi/sudut matahari terhadap keluaran sel surya, pembuatan sistem pelacak, pengujian sistem pelacak, pengambilan data serta analisa data.

Pada penelitian ini akan diambil data keluaran panel sel surya dengan pelacak dan panel sel surya diam. Keluaran tersebut akan dihitung dalam bentuk energi selama pengukuran yang kemudian dibandingkan keduanya.

3.5 Prosedur Penelitian

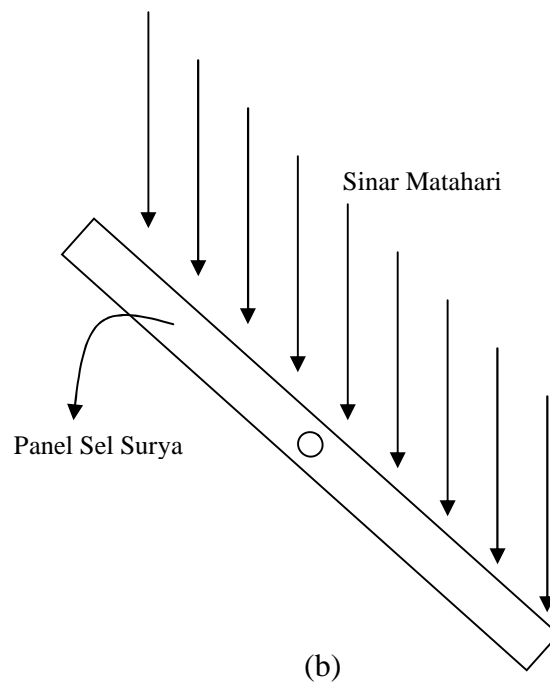
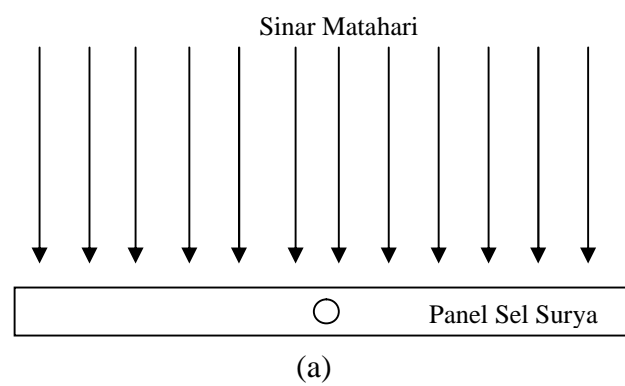
Gambaran umum langkah-langkah kerja dalam penelitian ini dapat dilihat dalam diagram blok pada gambar 3.2 .



Gambar 3.2 Diagram blok langkah-langkah penelitian

3.5.1. Pengujian Pengaruh Sudut Datang terhadap Keluaran Sel Surya

Pada penelitian ini pertama dilakukan adalah pengujian pengaruh sudut datang matahari terhadap keluaran sel surya. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh sudut datang matahari dan juga seberapa besar pengaruh sudut tersebut dapat diabaikan. Cara pengujian dilakukan seperti gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pengujian pengaruh arah sudut matahari terhadap keluaran sel surya (a) arah sinar tegak lurus panel (b) arah sinar membentuk sudut tertentu

Pemasangan sebuah panel sel surya dengan posisi tegak lurus terhadap arah sinar matahari seperti gambar 3.3a dilakukan untuk mengetahui keluaran maksimum, sedangkan untuk mengetahui pengaruh arah sinar matahari terhadap keluaran panel dilakukan dengan merubah arah panel sel surya tiap 10° hingga mencapai sudut 60°

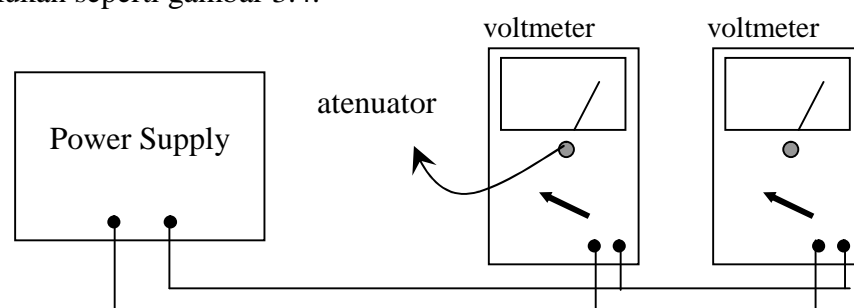
terhadap sudut datang matahari seperti gambar 3.3b. Dari langkah-langkah tersebut dapat diketahui pengaruh arah sinar matahari terhadap keluaran panel sel surya.

3.5.2. Pengambilan Data Posisi/Sudut Matahari

Pengambilan data posisi/sudut matahari sangat diperlukan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pergeseran sudut matahari pada selang waktu tertentu. Pengambilan data ini dilakukan pukul 9.00 hingga pukul 16.00. Hasil yang diperoleh pada langkah ini digunakan untuk perhitungan besar pergeseran arah panel sel setiap lima menit, karena sistem pelacak pada penelitian ini dilakukan pergeseran tiap lima menit.

3.5.3. Penyamaan Skala Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah 2 buah voltmeter dan 2 buah amperemeter. Untuk mendapatkan alat ukur yang mempunyai kesamaan dalam kemampuan pengukuran perlu adanya penyamaan skala. Penyamaan skala voltmeter dilakukan seperti gambar 3.4.

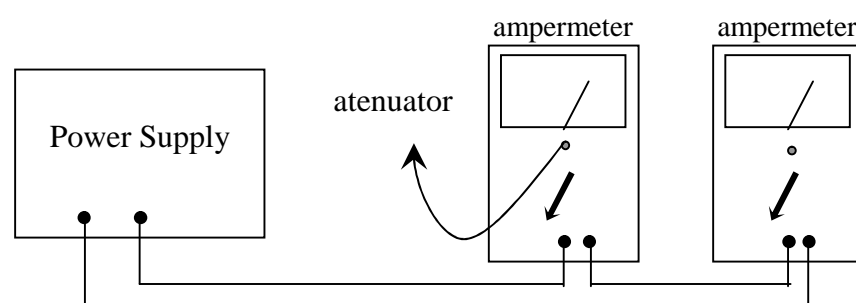


Gambar 3.4 Skema penyamaan skala pada voltmeter

Rangkaian parallel mempunyai tegangan sama pada setiap cabangnya (Alonso and Finn, 1992) sehingga penyamaan skala voltmeter dilakukan dengan menghubungkan 2 buah voltmeter tersebut secara parallel dengan catu daya yang mempunyai keluaran tertentu seperti gambar 3.4. Langkah selanjutnya adalah

memutar antenuator sampai mendapatkan kesamaan skala pada kedua voltmeter tersebut.

Penyamaan skala amperemeter dilakukan dengan menghubungkan secara seri 2 buah amperemeter dengan catu daya seperti gambar 3.5.

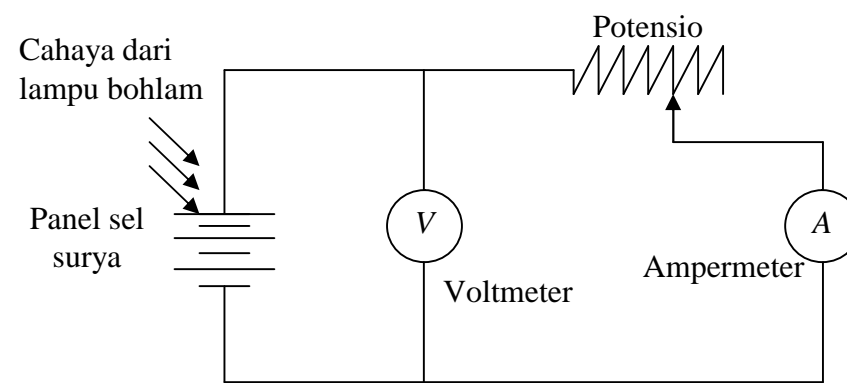


Gambar 3.5 Skema penyamaan skala pada amperemeter

Rangkaian seri mempunyai arus sama pada semua titik (Alonso and Finn, 1992) sehingga penyamaan skala amperemeter dilakukan dengan menghubungkan 2 buah amperemeter tersebut secara seri dengan catu daya yang mempunyai keluaran arus tertentu seperti gambar 3.5. Langkah selanjutnya adalah memutar antenuator sampai mendapatkan kesamaan skala pada kedua amperemeter tersebut.

3.5.4. Pengujian Karakteristik Panel Sel Surya

Untuk melakukan pengujian terhadap karakteristik sel surya diperlukan cahaya dengan intensitas konstan. Intensitas konstan sangat sulit didapatkan dari cahaya matahari sehingga pada pengujian ini digunakan lampu lampu bohlam 100 watt. Alat ukur yang digunakan adalah voltmeter dan amperemeter. Bentuk rangkaian pengujian ini dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Rangkaian pengujian karakteristik sel surya

Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai hambatan pada potensio. Dengan perubahan nilai hambatan tersebut akan didapatkan variasi nilai arus dan tegangan.

3.5.5. Pengujian Keluaran Panel Sel Surya

Pada penelitian ini akan dibandingkan keluaran panel sel surya menggunakan sistem pelacak dengan keluaran panel sel surya diam. Dengan demikian diperlukan dua buah panel sel surya yang memiliki keluaran sama ketika menerima cahaya dengan intensitas sama. Pengujian keluaran sel surya ini dilakukan dengan cara meletakkan kedua panel sel surya menghadap ke atas dengan posisi sejajar dan berdekatan agar mendapatkan intensitas matahari yang setara antara keduanya. Data keluaran panel sel surya diambil setiap 2 menit selama 30 menit.

3.5.6. Pengujian Mikrokontroler

Pengujian mikrokontroler AT89C51 bertujuan untuk mengetahui kinerja mikrokontroler terutama pada *port-port* yang digunakan. Pengujian ini dilakukan dengan membuat dan menjalankan program dengan bahasa *assembly* menggunakan *software alds* yang mempunyai keluaran pada *port C*.

Pengujian ini dilakukan dengan membuat dan menjalankan program yang mempunyai keluaran pada port yang digunakan dalam sistem pelacak yaitu *port C*.

Program yang dijalankan adalah sebagai berikut:

```

                org 4000h
                ljmp start
                org 4100h
start:         mov a,#92h
                mov dptr,#2003h
                movx @dptr,a
                mov a,#01h      ;nilai logika input
                mov dptr,#2002h
                movx @dptr,a
                end

```

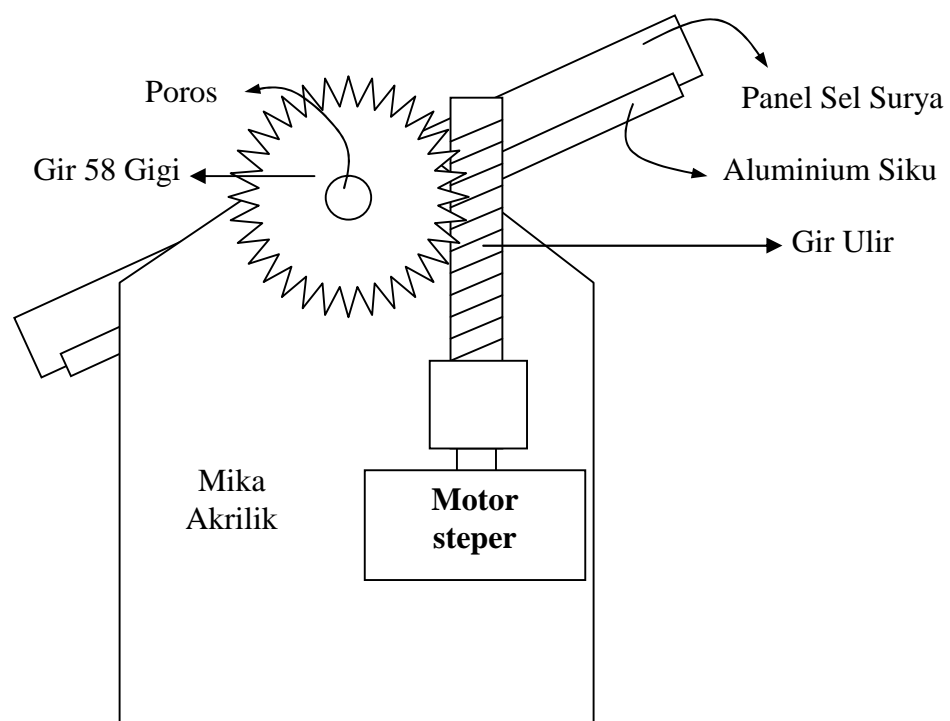
Dengan memasukkan nilai 01h pada akumulator sebagai logika masukan maka keluaran pada pin *port C* adalah 00000001. Untuk mengetahui nilai logika masing-masing pin *port C* dihubungkan dengan led. Pengujian secara keseluruhan pada *port C* dilakukan dengan mengganti nilai logika input yang terdapat pada akumulator dan menjalankan program kembali.

3.5.7. Pembuatan Sistem Pelacak

Prinsip kerja sistem pelacak panel sel surya yang akan dibuat adalah menggerakkan panel sel surya sebesar $1,31^0$ setiap 5 menit. Pembuatan sistem pelacak meliputi dua hal yaitu pembuatan *hardware* dan pembuatan *software*

3.5.7.1. Pembuatan Hardware

Bentuk skematik sistem pelacak panel sel surya dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Sistem *hardware* alat pelacak panel sel surya

Panel sel surya dikait dengan aluminium siku dan dipasang pada poros yang terhubung dengan gir besar. Poros terbuat dari sambungan 2 buah mur 5 cm, kemudian poros dihubungkan pada motor stepper dengan gir ulir. Komponen-komponen tersebut diletakkan pada kerangka yang terbuat dari mika akrilik seperti pada gambar 3.7.

Dipilih motor stepper sebagai penggerak, karena dapat dilakukan pengesetan besar sudut pergerakannya. Satu putaran motor stepper tersusun dari 200 detak, sehingga satu detak menghasilkan $1,8^0$.

Motor stepper dihubungkan dengan gir ulir dengan tujuan untuk mengerakkan panel sel surya agar lebih halus serta dapat digunakan sebagai pengunci panel ketika diperintahkan berhenti.

Gir ulir dihubungkan dengan gir besar yang memiliki 58 gerigi. Satu putaran gir ulir (yang terhubung dengan motor stepper) akan menggerakkan panel sebesar $1/58$ putaran. Dengan demikian sistem pelacak tersebut dapat menggerakkan panel sel surya dengan ketelitian $0,031^0$.

Susunan optimalisasi panel sel surya secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.8.



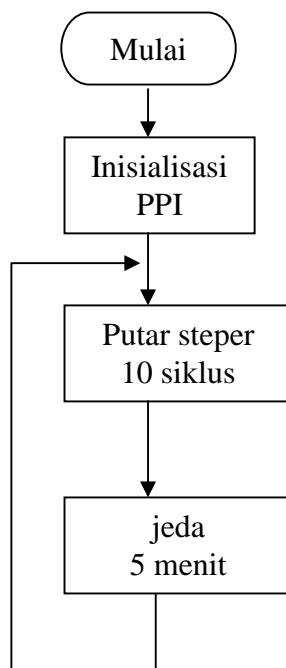
Gambar 3.8 Susunan optimalisasi panel sel surya secara keseluruhan (foto diambil pada saat pengambilan data di atas gedung fisika FMIPA UNS)

Keterangan Gambar:

1. Panel diam/Tetap (tanpa pelacak)
2. Panel dengan pelacak
3. Minimum sistem Mikrokontroler AT89C51
4. Voltmeter dan Ampermeter

3.5.7.2. Pembuatan Software

Secara garis besar *software* sistem pelacak ini menggunakan 2 buah rutin yaitu rutin stepper dan rutin delay. Diagram alir program utama dapat dilihat pada gambar 3.9.



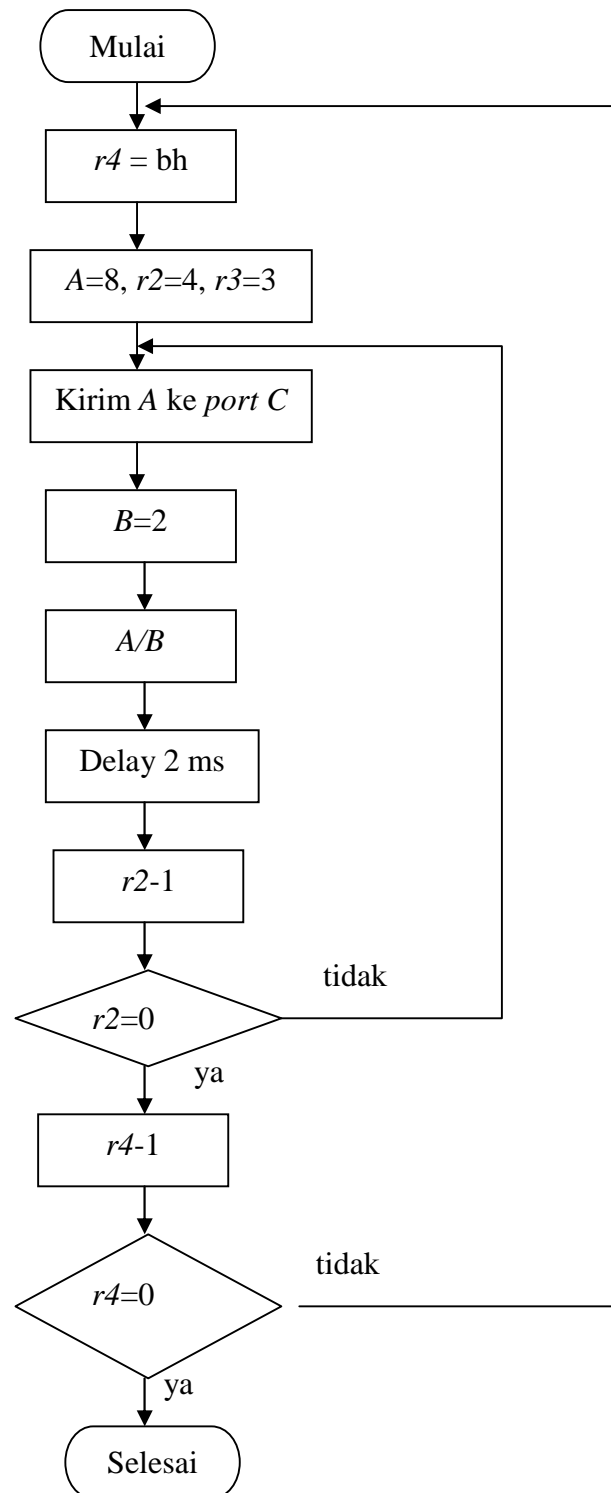
Gambar 3.9 Diagram alir program utama sistem pelacak panel sel surya

Instruksi yang pertama dijalankan program adalah inisialisasi PPI. Inisialisasi PPI bertujuan untuk mengubah *control word* PPI agar *port C* berfungsi sebagai keluaran. Setelah dilakukan inisialisasi PPI, program menjalankan rutin stepper yang berfungsi untuk menggerakkan motor stepper sebanyak 40 detak atau $1,31^0$ (satu step), kemudian menjalankan Rutin jeda untuk memberikan selang waktu sebesar 5 menit dari step satu ke step berikutnya. Diagram alir Rutin stepper, dan rutin jeda ditunjukkan pada gambar 3.10 dan 3.11.

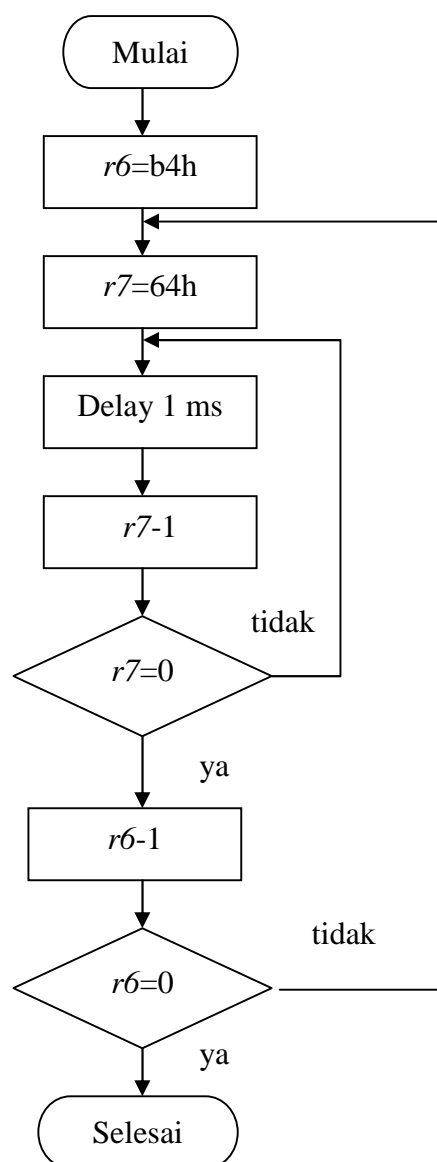
Rutin stepper berfungsi untuk menggerakkan motor stepper sebanyak 40 detak (satu step). Seperti terlihat pada diagram alir rutin stepper gambar 3.10, akumulator

diisi dengan nilai 8 dan dikirim ke *port C*. Kemudian nilai akumulator dibagi 2 dan dikirim kembali ke *port C* setelah selang 2 μ s. Langkah ini berjalan sebanyak 4 kali sehingga keluaran dari *port C* secara berturut-turut 8,4,2,1 atau dalam bentuk biner 1000,0100,0010,0001. Urutan tersebut digunakan sebagai siklus penggeser pulsa untuk menggerakkan motor stepper. Untuk menggerakkan panel sebesar 1,31⁰ diperlukan 10 siklus.

Gambar 3.11 adalah diagram alir rutin jeda. Rutin jeda berfungsi untuk memberikan selang waktu 5 menit ketika panel akan bergerak dari suatu step ke step berikutnya. Delay 1 μ s dibangkitkan oleh timer mode 1. Untuk menghasilkan selang 5 menit, delay 1 μ s tersebut diulang sebanyak nilai yang ada pada register 7 (r7) yaitu 64h (100 desimal), kemudian dilakukan pengulangan lagi sebanyak nilai yang terdapat pada register 6 (r6) yaitu b4h (180 desimal).



Gambar 3.10 Diagram alir Rutin Steper

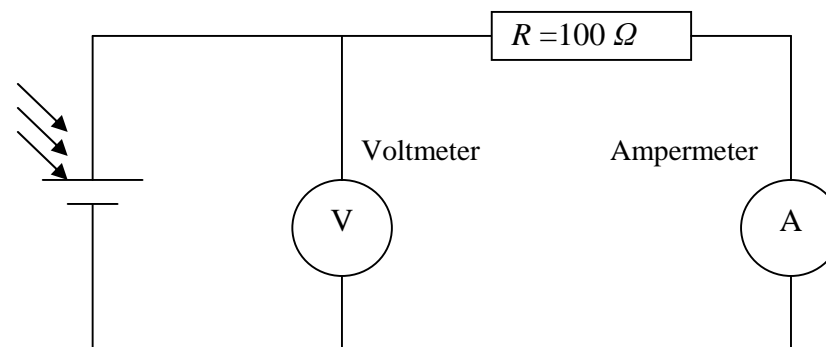


Gambar 3.11 Diagram alir Rutin Delay

3.5.8. Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data keluaran panel sel surya dengan dengan sistem pelacak dan sel surya tanpa system pelacak (diam). Hal yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan perbandingan keluaran yang benar setelah diketahui kedua buah panel sel surya mempunyai respon keluaran sama adalah cara pengambilan data. Pada saat pengambilan data, kedua buah panel diletakkan pada

tempat yang berdekatan dan memiliki ketinggian yang sama, serta diukur pada saat yang bersamaan. Rangkaian pengukuran keluaran panel sel surya seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Rangkaian pengukuran keluaran panel sel surya

Masing-masing panel sel surya dihubungkan dengan voltmeter dan amperemeter seperti gambar 3.11. Beban yang digunakan dipilih $R = 100 \, \Omega$ karena nilai tersebut adalah nilai yang layak untuk digunakan sesuai dengan hasil pengujian karakteristik panel sel surya.

Pengukuran daya tersebut dilakukan dengan voltmeter dan amperemeter karena daya merupakan faktor perkalian antara arus dan tegangan. Keluaran yang terukur adalah keluaran daya yang melewati beban $R = 100 \, \Omega$.

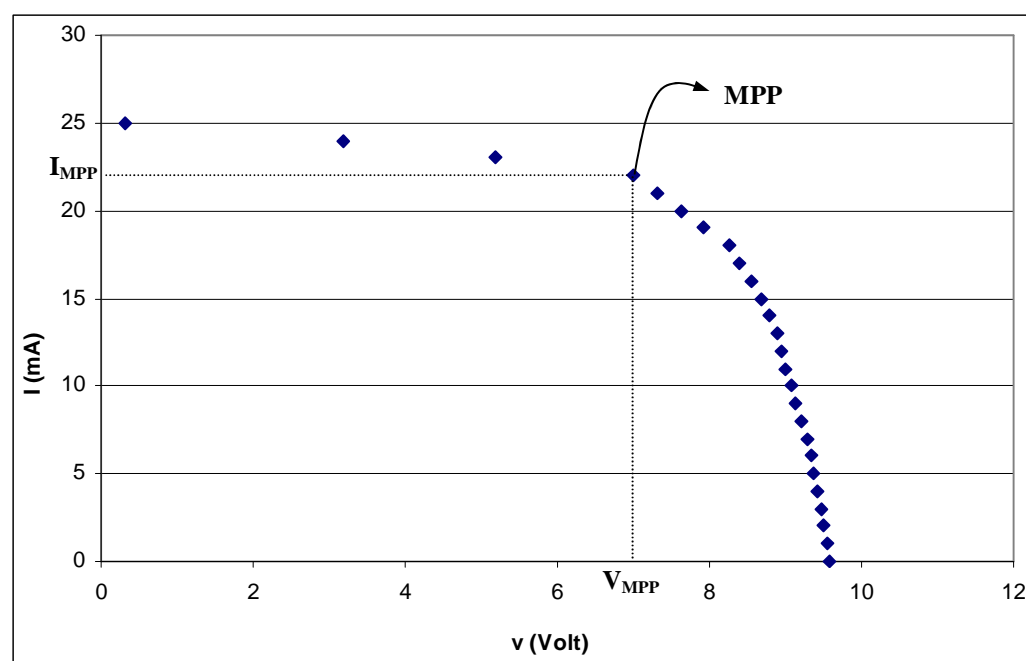
BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan paparkan hasil penelitian yang mencakup hasil pengujian karakteristik panel sel surya, hasil pengujian *timer*, hasil pengujian derajat pergerakan panel sel surya, serta keluaran sel surya seperti yang telah dilakukan pada bab III.

4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) Panel Sel Surya

Hasil pengujian karakteristik sel surya dapat ditampilkan dalam hubungan arus terhadap tegangan seperti gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik arus-tegangan hasil pengujian karakteristik sel surya

Arus rangkaian pendek atau I_{SC} (*short circuit current*) terjadi pada saat tegangan sel surya sama dengan nol. Besarnya nilai I_{SC} pada pengukuran ini adalah 25 mA. Tegangan rangkaian terbuka atau V_{OC} (*open circuit voltage*) terjadi pada saat arus sel

surya sama dengan nol. Besarnya nilai V_{oc} pada pengujian ini adalah 9.59 volt. Pada pengujian ini intensitas cahaya yang mengenai panel adalah 63,09 watt/m² yang dihasilkan dari bohlam 100 watt. Nilai titik daya maksimum atau MPP (*maximum power point*) adalah 153.78 mwatt terjadi pada saat $V_{MPP} = 6.9$ volt dan $I_{MPP} = 22$ mA. Dengan menggunakan persamaan 2.3 didapatkan efisiensi panel sel surya adalah sebesar 18,6 %.

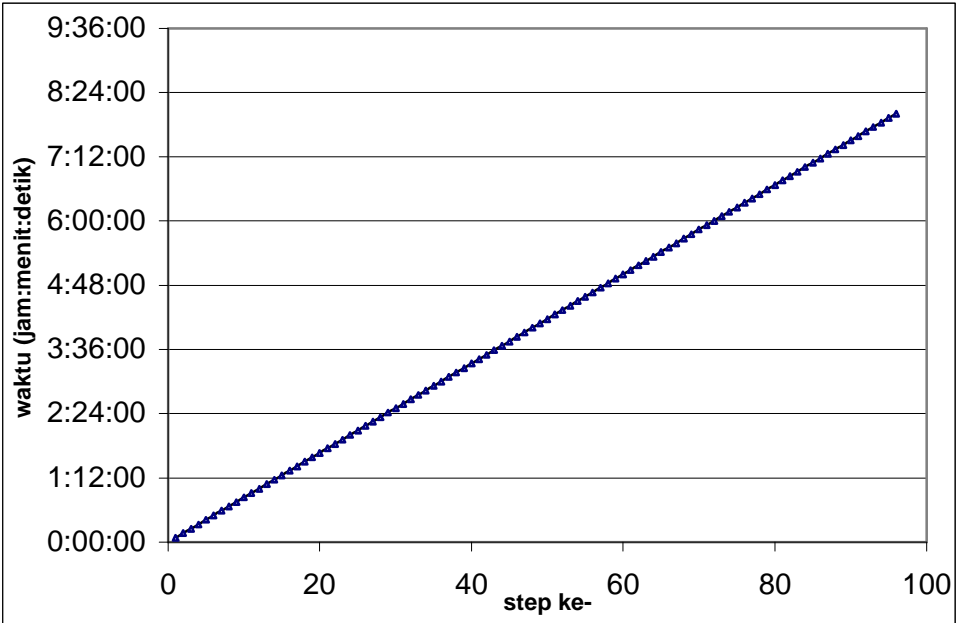
Dari gambar 4.1 dapat dilihat karakteristik sel surya, yaitu semakin besar nilai tegangan maka arus yang mengalir semakin kecil. Karakteristik tersebut berbeda dengan sumber tegangan (*voltage source*) maupun sumber arus (*current source*). Sumber tegangan yang ideal akan memberikan tegangan yang konstan ketika diberikan beban yang bervariasi dan sumber arus yang ideal akan memberikan arus yang konstan ketika diberikan beban yang bervariasi (Malik, 1995). Dengan demikian sel surya tidak bisa disebut sebagai sumber tegangan maupun sumber arus.

4.2 Hasil Pengujian Timer

Mikrokontroler 89C51 memiliki frekuensi pembangkit detak sebesar 12 MHz. Pembangkit detak internal ini menentukan rentetan kondisi-kondisi (*state*) yang membentuk sebuah siklus mesin mikrokontroler. Siklus mesin tersebut diberi nomor S1 hingga S6, yang masing-masing panjangnya 2 periode osilator. Dengan menggunakan kristal frekuensi 12 MHz satu siklus mesin paling lama dikerjakan dalam waktu 1 μ s.

Untuk menghasilkan delay 5 menit maka diperlukan 3×10^8 siklus mesin yang dibuat dalam rutin delay. Dalam sistem pelacak ini rutin delay digunakan untuk memberikan selang waktu antar step pada pergerakan panel sel surya. Pengujian

timer dilakukan dengan mengamati pergerakan panel sel surya setiap saat. Alat ukur yang digunakan adalah stopwatch digital. Adapun hasil pengujian *timer* dapat dilihat pada gambar 4.2.

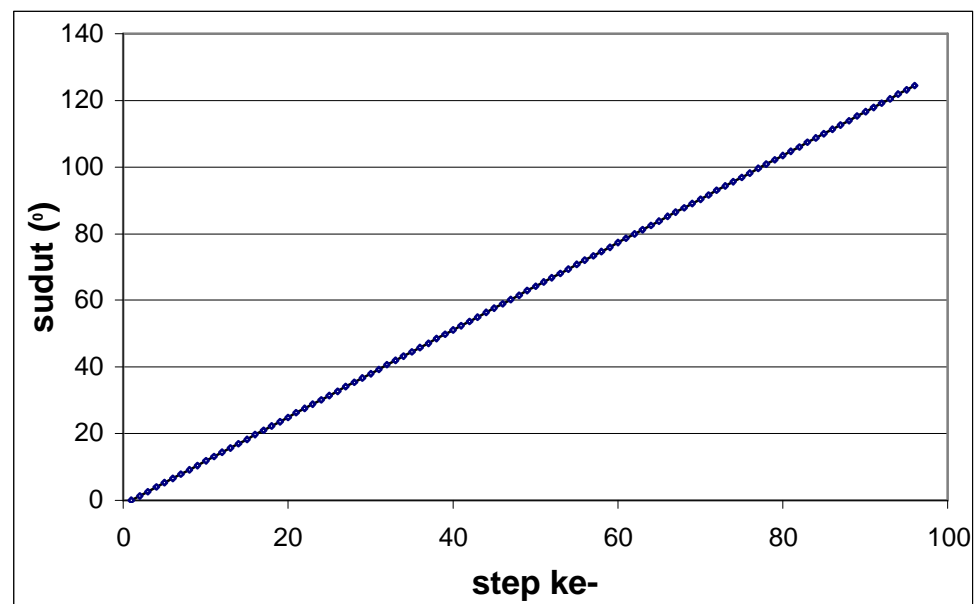


Gambar 4.2 Grafik pengujian *timer* mikrokontroler AT89C51

Pada grafik pengujian *timer*, sumbu x adalah step pergerakan panel dan sumbu y adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai step tersebut. Dari hasil pengujian, didapatkan *timer* bekerja sesuai dengan yang dibutuhkan. *Timer* menghasilkan waktu 5 menit untuk satu step.

4.3 Hasil Pengujian Derajat Pergerakan Panel

Pengujian ini dilakukan dengan mengamati derajat pergerakan panel sel surya setiap step. Hasil pengujian derajat pergerakan panel dapat dilihat pada gambar 4.3.



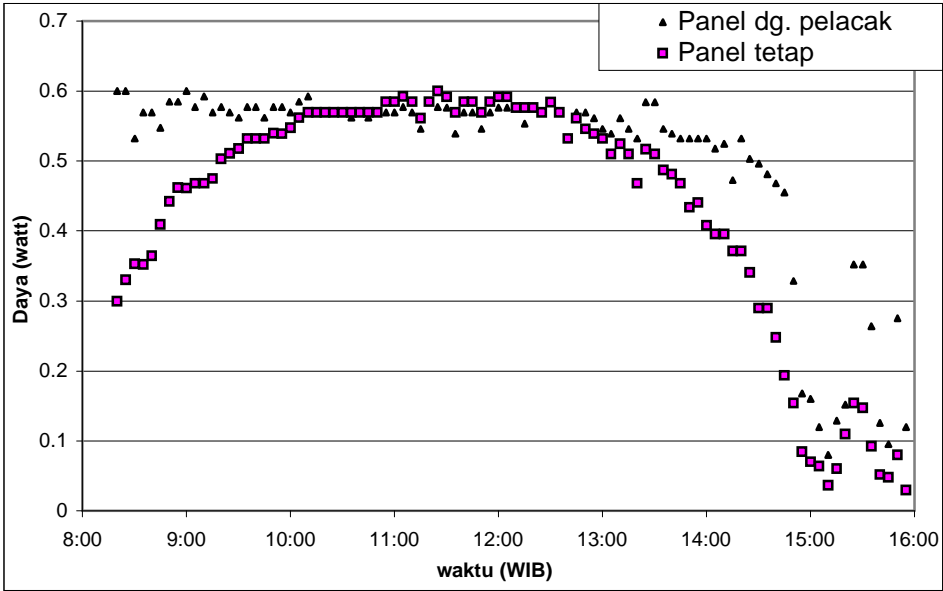
Gambar 4.3 Grafik pengujian drajat pergerakan panel tiap 5 menit

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hubungan antara sudut yang dicapai dari titik awal terhadap perubahan step. Dari grafik tersebut terlihat hubungan linier antara step dengan perubahan sudut pergerakan panel sel surya. Hasil pengujian pada sistem pelacak ini derajat pergeseran panel adalah $1,3^{\circ}$ tiap step.

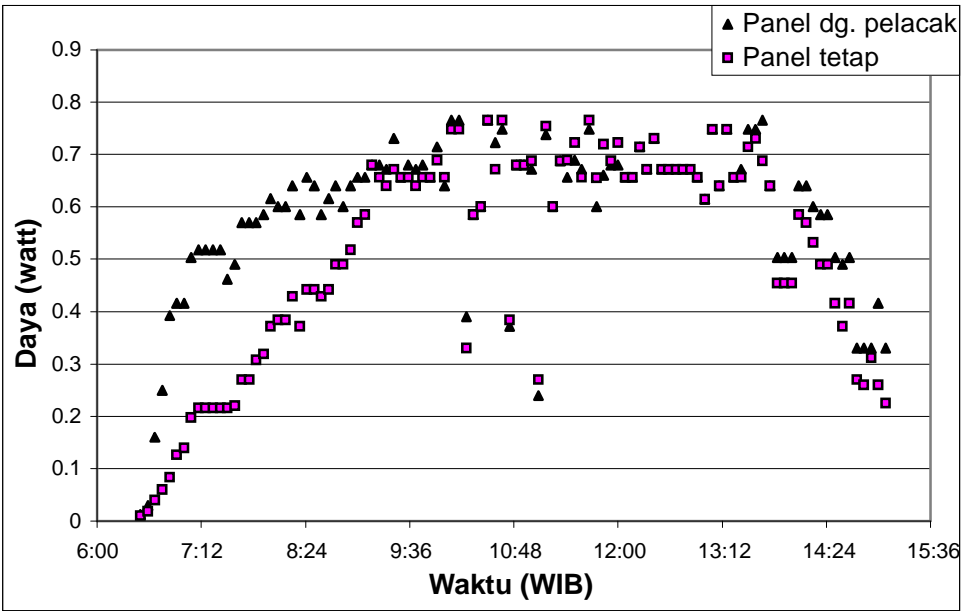
4.4 Keluaran Panel Sel Surya

Pada penelitian ini diukur keluaran panel sel surya dengan sistem pelacak dan panel sel surya diam. Kedua panel sel surya diletakkan pada posisi ketinggian yang sama dan diukur secara bersamaan. Panel 1 adalah panel sel surya dengan sistem pelacak, yang bergerak sebesar $1,31^{\circ}$ tiap 5 menit sedangkan panel 2 adalah panel sel surya yang diset permukaannya tegak lurus normal atau sejajar dengan arah horizontal.

Pada penelitian ini dilakukan dua kali pengukuran. Hasil yang diperoleh pada masing-masing pengukuran keluaran panel sel surya ditunjukkan pada gambar 4.4 dan gambar 4.5.



Gambar 4.4 Grafik keluaran panel sel surya pengukuran I



Gambar 4.5 Grafik keluaran panel sel surya pengukuran II

Dari grafik pada gambar 4.4 dan gambar 4.5 dapat dilihat bahwa pada waktu pagi panel 1 memiliki keluaran daya lebih besar daripada panel 2 ini terlihat pada pengukuran I sebelum pukul 10.10 dan pada pengukuran II sebelum pukul 09.10.

Dengan adanya sistem pelacak menyebabkan pada siang hari arah panel 1 mendekati sejajar arah horizontal. Dengan demikian posisi panel 1 ini hampir sama dengan posisi panel 2 yang diset sejajar arah horizontal. Dari kedua hasil pengukuran pada selang waktu tersebut didapatkan anantara panel 1 dan panel 2 memiliki besar keluaran daya yang hampir sama. Hal ini terlihat pada pengukuran I antara pukul 10.15 sampai dengan pukul 12.45 dan pada pengukuran II antara pukul 09.30 sampai dengan pukul 13.25.

Pada waktu sore hari panel 1 kembali memiliki keluaran lebih tinggi dibandingkan panel 2. Hal ini terlihat pada pengukuran I setelah pukul 12.45 dan pada pengukuran II setelah pukul 13.25.

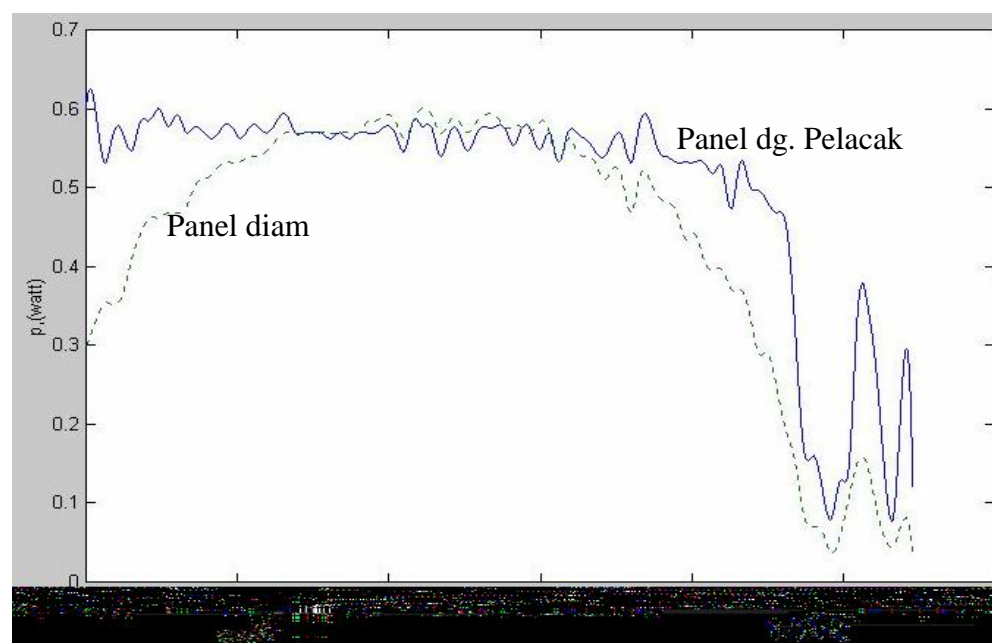
Secara umum pada waktu pagi dan sore hari panel 1 memiliki keluaran lebih besar dibandingkan panel 2. Hal ini disebabkan karena adanya faktor $\cos \theta$ dimana θ adalah sudut yang terbentuk antara arah datang sinar matahari dengan normal bidang panel. Pada saat tersebut panel 2 membentuk sudut θ terhadap arah sinar matahari sedangkan panel 1 permukaannya diset selalu tegak lurus terhadap arah datang sinar matahari. Semakin besar nilai sudut θ maka semakin kecil keluaran panel sel surya yang dihasilkan.

Pada pengukuran I secara umum keluaran panel 1 relatif stabil pada kisaran 500 hingga 600 miliwatt sedangkan keluaran daya dibawah 500 miliwatt hanya terjadi pada waktu sore hari setelah pukul 14.25. Sedangkan keluaran panel 2

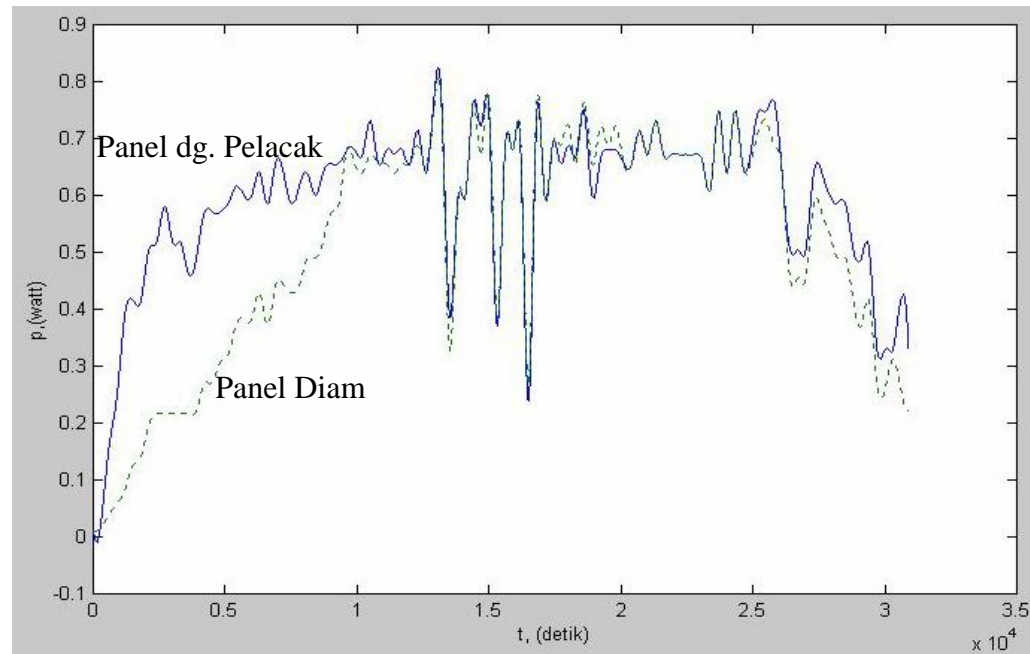
mengalami kenaikan dan penurunan sesuai besar sudut datang matahari terhadap bidang panel sel surya. Pada pengukuran II terjadi fluktuasi keluaran yang disebabkan adanya faktor cuaca. Kedua hasil pengukuran tersebut sempat terjadi panel diam memiliki keluaran lebih besar daripada panel dengan pelacak pada waktu siang, hal tersebut disebabkan karena panel dengan pelacak selalu mendapatkan sinar tegak lurus permukaan sehingga temperatur panel lebih besar dibandingkan panel diam yang menyebabkan efisiensi panel turun.

Dari grafik kedua pengukuran tersebut secara umum memiliki pola yang sama yaitu membentuk parabola / garis melengkung. Hal ini sesuai dengan intensitas radiasi harian matahari yang sampai permukaan bumi seperti ditunjukkan grafik gambar 2.6.

Untuk menghitung energi keluaran diperlukan metode interpolasi. Dengan menggunakan metode interpolasi maka didapatkan grafik seperti gambar 4.6 untuk pengukuran I dan gambar 4.7 untuk pengukuran II



Gambar 4.6 Grafik keluaran panel sel surya dengan interpolasi pengukuran I



Gambar 4.7 Grafik keluaran panel sel surya dengan interpolasi pengukuran II

Dari hasil penelitian ini dapat diketahui besar energi yang dihasilkan masing-masing panel sel surya. Pengukuran I dilakukan selama 7 jam 35 menit dan pengukuran II dilakukan selama 8 jam 35 menit. Penghitungan energi dilakukan dengan metode interpolasi menggunakan software matlab 5.3.

Dari hasil perhitungan tersebut didapatkan pada pengukuran I panel 1 menghasilkan energi sebesar 13.779 joule, sedangkan panel 2 menghasilkan energi sebesar 11.982 joule. Energi yang dibutuhkan dalam sistem pelacak adalah sebesar 1,3949 joule. Jika peningkatan energi disimbolkan dengan ϵ maka dengan adanya penambahan sistem pelacak pada panel sel surya pada pengukuran I menghasilkan peningkatan energi sebesar

$$\epsilon = \frac{E_{tracking} - E_{diam} - E_{buang}}{E_{diam}} \times 100\%$$

$$\epsilon = \frac{13.779 - 11.982 - 1,39}{11.982} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 14.98 \%$$

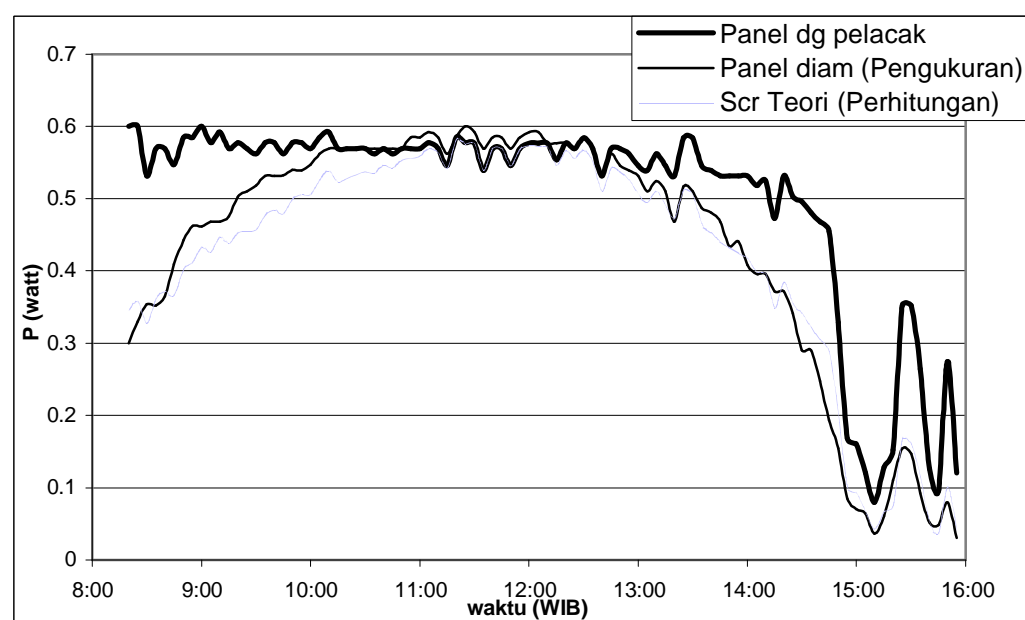
Dari hasil perhitungan pada pengukuran II didapatkan panel 1 menghasilkan energi sebesar 18.363 joule, sedangkan panel 2 menghasilkan energi sebesar 15.914 joule. Energi yang dibutuhkan dalam sistem pelacak adalah sebesar 1,5788 joule. Dengan demikian, adanya penambahan sistem pelacak pada panel sel surya pada pengukuran I menghasilkan peningkatan energi sebesar

$$\varepsilon = \frac{E_{tracking} - E_{diam} - E_{buang}}{E_{diam}} \times 100\%$$

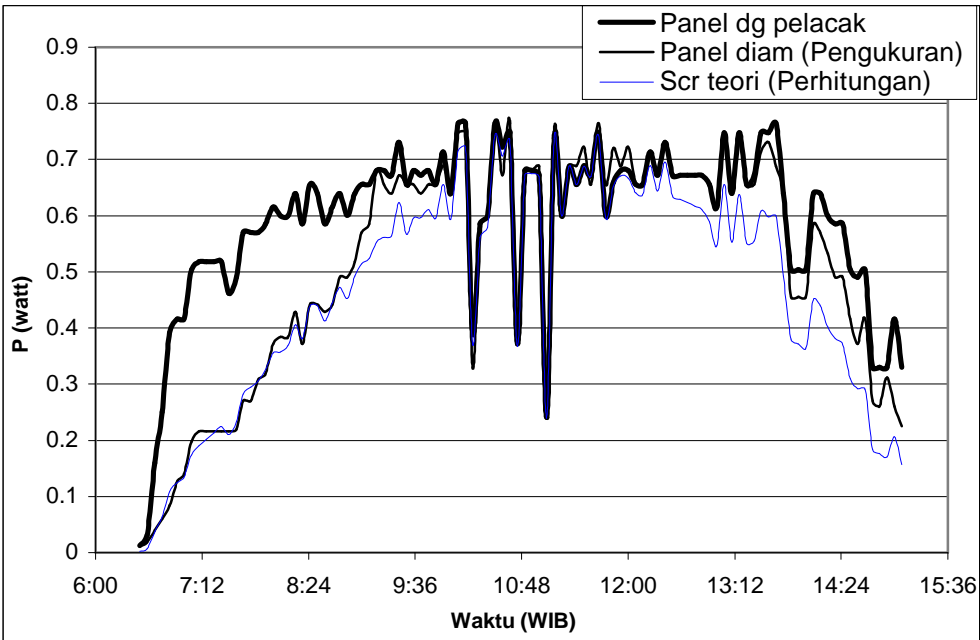
$$\varepsilon = \frac{18.363 - 15.914 - 1.58}{15.914} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 15,37\%$$

Adapun hasil perhitungan secara teori, apabila radiasi yang diterima panel 1 dianggap sebagai I_{r_o} (radiasi maksimum) maka pengaruh faktor $\cos q$ terhadap I_r seperti pada persamaan 2.4 dapat digambarkan seperti grafik berikut:



Gambar 4.8 Grafik perbandingan antara hasil pengukuran I dengan teori



Gambar 4.9 Grafik perbandingan antara hasil pengukuran II dengan teori

Dari gambar 4.8 dan gambar 4.9 tersebut terlihat adanya kemiripan pola antara hasil pengukuran dan teori. Adapun secara kuantitatif terjadi perbedaan nilai antara keduanya. Keluaran yang didapatkan dari pengukuran secara umum mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan dengan hasil perhitungan pengaruh sudut sebagai fungsi $\cos \theta$. Hal tersebut disebabkan karena adanya difusi cahaya matahari. Akibat difusi cahaya matahari menyebabkan panel menerima radiasi dari berbagai arah sehingga keluaran panel sel surya lebih besar bila dibandingkan dengan panel yang hanya menerima cahaya langsung dari matahari.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Pengendalian sistem pelacak sel surya bisa dilakukan dengan mikrokontroler AT89C51 berdasarkan sistem *timer*.
2. Panel sel surya dengan menggunakan sistem pelacak menghasilkan keluaran energi lebih besar dibandingkan sel surya dengan posisi diam. Peningkatan keluaran energi jika dibandingkan dengan panel pada posisi tetap adalah sebesar 14,98% pada pengukuran I dan 15,37% pada pengukuran II.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dari skripsi ini diberikan saran-saran sebagai berikut:

1. Pembuatan sistem pelacak untuk keperluan sepanjang tahun dengan model empat derajat kebebasan karena adanya pergeseran matahari pada arah utara dan selatan.
2. Pembuatan sistem pelacak menggunakan sistem kontrol tertutup sebagai cara untuk mengetahui posisi panel pada intensitas tertinggi.

Daftar Pustaka

- Agfiyanto E.P., 2004: *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (Teori dan Aplikasi)*, edisi 2, Gava Media, Yoryakarta.
- Anonim, 2005: *Photovoltaic Fundamentals*,
<http://www.fsec.ucf.edu/pvt/pvbasics/index.htm>.
- Anonim, 2004: *Data Sheet AT89C51*, <http://www.atmel.com>
- Alonso, M. and Finn, E.J., 1992: *Dasar Dasar Fisika Universitas*, edisi kedua, Erlangga, Jakarta.
- Dwi Sutadi, 2003: *I/O Bus & Motherboard*, edisi 1, Andi, Yogyakarta.
- Fishbane, P.M., Gasirowicz, S., and Thornton, S.T., 1996: *Physics For Scientists and engineers*, 2nd edition, Prentice-hall, New Jersey.
- Hantoro Dwi P., 2002: *Kompensasi Temperatur pada Alat Ukur Tinggi Cairan Berdasarkan Waktu Jalar Gelombang Ultrasonik Berbasis Mikrokontroler 89C51*, Skripsi S1 Fisika FMIPA UNS, Surakarta.
- Jansen, T.J., 1995: *Teknologi Rekayasa Sel Surya*, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Malik, N.R., 1995: *Electronic Circuits Analisis, Simulation, and Design*. Prentice-hall, New Jersey.
- Pruit, D., 2001: *The Simulation Of Building Integrated Photovoltaics In Commercial Office Buildings*, Seventh International IBPSA Conference, Rio De Jainero.
- Quaschnig, V., 2004: *Renewable Energy World*, Science Publisher, German.
- Rusminto Tjatur W, 2003: *Solar Cell Sumber Energi masa depan yang ramah lingkungan*, Berita Iptek, Jakarta.
- Scott, M.I., 1995: *The 8051 Microcontroller*, Prentice-hall, New Jersey.
- Toci, R.J., Widmer, N.S., and Moss, G.L., 2004: *Digital System*, 9th edition, Prentice-hall, New Jersey.
- Wilson W.W., 1996: *Teknologi Sel Surya : Perkembangan Dewasa Ini dan yang Akan Datang*, Edisi ke empat, Elektro Indonesia, Jakarta.
- Young, W.D. and Freedman, R.A., 1996: *University Physics*, ninth edition, Addison-Wesley, California.

Lampiran 1

Pengaruh posisi matahari terhadap Keluaran panel sel surya

waktu	Sudut	panel tetap		Panel tegak lurus		Panel $\theta = 10$		Panel $\theta = 20$		Panel $\theta = 30$		Panel $\theta = 40$		Panel $\theta = 50$		Panel $\theta = 60$	
		I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V
9.00	50^0	2.19	10.26	2.21	10.44	2.2	10.43	2.19	10.38	2.19	10.33	2.19	10.26	2.18	10.14	2.15	9.97
10.00	70^0	2.25	10.45	2.27	10.55	2.26	10.52	2.25	10.45	2.24	10.33	2.23	10.3	2.22	10.19	2.19	9.89
11.00	80^0	2.27	10.79	2.28	10.81	2.27	10.79	2.27	10.75	2.26	10.68	2.25	10.67	2.24	10.51	2.23	10.37
12.00	100^0	2.26	10.83	2.27	10.87	2.27	10.81	2.26	10.75	2.26	10.68	2.25	10.58	2.25	10.45	2.22	10.22
13.00	120^0	2.24	10.77	2.27	10.92	2.24	10.74	2.23	10.67	2.22	10.57	2.21	10.46	2.2	10.34	2.19	10.15
14.00	130^0	2.23	10.64	2.23	10.81	2.22	10.79	2.22	10.76	2.21	10.69	2.21	10.61	2.2	10.49	2.18	10.29
15.00	140^0	2.22	10.57	2.24	10.83	2.22	10.77	2.22	10.74	2.21	10.66	2.2	10.56	2.19	10.49	2.18	10.29
16.00	160^0	1.05	9.85	2.21	10.55	2.2	10.52	2.2	10.47	2.18	10.36	2.18	10.3	2.16	10.25	2.16	9.98

Lampiran 2

Hasil pengujian karakteristik panel sel surya

v (Volt)	I (mA)	R (ohm)	P (mwatt)
0.32	25	15	8
3.19	24	130	76.56
5.19	23	300	119.37
6.99	22	360	153.78
7.31	21	420	153.51
7.62	20	480	152.4
7.93	19	500	150.67
8.25	18	550	148.5
8.4	17	550	142.8
8.56	16	550	136.96
8.68	15	600	130.2
8.78	14	650	122.92
8.89	13	675	115.57
8.96	12	750	107.52
9.01	11	850	99.11
9.08	10	950	90.8
9.14	9	1000	82.26
9.21	8	1150	73.68
9.28	7	1300	64.96
9.33	6	1500	55.98
9.38	5	1800	46.9
9.42	4	2100	37.68
9.47	3	3200	28.41
9.51	2	4500	19.02
9.56	1	9000	9.56
9.59	0	~	0

Lampiran 3

Hasil pengujian keluaran panel sel surya

Panel 1		Panel 2	
V (volt)	I (mA)	V (volt)	I (mA)
7.8	74	7.8	74
7.75	72.5	7.75	72.5
7.7	72.5	7.7	72.5
7.6	70	7.6	70
7.5	7	7.5	7
7.8	74	7.8	74
7.6	72.5	7.6	72.5
3.3	10	3.3	10
5	15	5	15
7.5	70	7.5	70
7.8	72.5	7.8	72.5
7.8	72.5	7.8	72.5
7.5	72.5	7.5	72.5
7.6	72.5	7.6	72.5
7.8	74	7.8	74

Lampiran 4
Uji Port C Mikrokontroler

input	output	input	output	input	output	input	output
0	0	40	40	80	80	120	120
1	1	41	41	81	81	121	121
2	2	42	42	82	82	122	122
3	3	43	43	83	83	123	123
4	4	44	44	84	84	124	124
5	5	45	45	85	85	125	125
6	6	46	46	86	86	126	126
7	7	47	47	87	87	127	127
8	8	48	48	88	88	128	128
9	9	49	49	89	89	129	129
10	10	50	50	90	90	130	130
11	11	51	51	91	91	131	131
12	12	52	52	92	92	132	132
13	13	53	53	93	93	133	133
14	14	54	54	94	94	134	134
15	15	55	55	95	95	135	135
16	16	56	56	96	96	136	136
17	17	57	57	97	97	137	137
18	18	58	58	98	98	138	138
19	19	59	59	99	99	139	139
20	20	60	60	100	100	140	140
21	21	61	61	101	101	141	141
22	22	62	62	102	102	142	142
23	23	63	63	103	103	143	143
24	24	64	64	104	104	144	144
25	25	65	65	105	105	145	145
26	26	66	66	106	106	146	146
27	27	67	67	107	107	147	147
28	28	68	68	108	108	148	148
29	29	69	69	109	109	149	149
30	30	70	70	110	110	150	150
31	31	71	71	111	111	151	151
32	32	72	72	112	112	152	152
33	33	73	73	113	113	153	153
34	34	74	74	114	114	154	154
35	35	75	75	115	115	155	155
36	36	76	76	116	116	156	156
37	37	77	77	117	117	157	157
38	38	78	78	118	118	158	158
39	39	79	79	119	119	159	159

input	output		input	output		input	output
160	160		200	200		240	240
161	161		201	201		241	241
162	162		202	202		242	242
163	163		203	203		243	243
164	164		204	204		244	244
165	165		205	205		245	245
166	166		206	206		246	246
167	167		207	207		247	247
168	168		208	208		248	248
169	169		209	209		249	249
170	170		210	210		250	250
171	171		211	211		251	251
172	172		212	212		252	252
173	173		213	213		253	253
174	174		214	214		254	254
175	175		215	215		255	255
	176	176		216	216		
	177	177		217	217		
	178	178		218	218		
	179	179		219	219		
	180	180		220	220		
	181	181		221	221		
	182	182		222	222		
	183	183		223	223		
	184	184		224	224		
	185	185		225	225		
	186	186		226	226		
	187	187		227	227		
	188	188		228	228		
	189	189		229	229		
	190	190		230	230		
	191	191		231	231		
	192	192		232	232		
	193	193		233	233		
	194	194		234	234		
	195	195		235	235		
	196	196		236	236		
	197	197		237	237		
	198	198		238	238		
	199	199		239	239		

Lampiran 5

Hasil pengujian *timer*

step ke-	Waktu (jam:menit:detik)
1	0:05:00
2	0:10:00
3	0:15:00
4	0:20:00
5	0:25:00
6	0:30:01
7	0:35:01
8	0:40:01
9	0:45:01
10	0:50:01
11	0:55:03
12	1:00:03
13	1:05:03
14	1:10:03
15	1:15:03
16	1:20:04
17	1:25:04
18	1:30:04
19	1:35:04
20	1:40:04
21	1:45:05
22	1:50:05
23	1:55:05
24	2:00:05
25	2:05:05
26	2:10:06
27	2:15:06
28	2:20:06
29	2:25:06
30	2:30:06
31	2:35:07
32	2:40:07
33	2:45:07
34	2:50:07
35	2:55:07
36	3:00:08
37	3:05:08
38	3:10:08
39	3:15:08
40	3:20:08
41	3:25:09
42	3:30:09
43	3:35:09
44	3:40:09
45	3:45:09
46	3:50:10
47	3:55:10
48	4:00:10

step ke-	Waktu (jam:menit:detik)
49	4:05:10
50	4:10:10
51	4:15:11
52	4:20:11
53	4:25:11
54	4:30:11
55	4:35:11
56	4:40:12
57	4:45:12
58	4:50:12
59	4:55:12
60	5:00:12
61	5:05:13
62	5:10:13
63	5:15:13
64	5:20:13
65	5:25:13
66	5:30:14
67	5:35:14
68	5:40:14
69	5:45:14
70	5:50:14
71	5:55:15
72	6:00:15
73	6:05:15
74	6:10:15
75	6:15:15
76	6:20:16
77	6:25:16
78	6:30:16
79	6:35:16
80	6:40:16
81	6:45:17
82	6:50:17
83	6:55:17
84	7:00:17
85	7:05:17
86	7:10:18
87	7:15:18
88	7:20:18
89	7:25:18
90	7:30:18
91	7:35:19
92	7:40:19
93	7:45:19
94	7:50:19
95	7:55:19
96	8:00:20

Lampiran 6

Hasil pengujian sudut pergerakan panel sel surya

step ke-	sudut (⁰)	step ke-	sudut (⁰)
1	0	49	62.9
2	1.3	50	64.2
3	2.6	51	65.5
4	3.9	52	66.8
5	5.2	53	68.1
6	6.5	54	69.4
7	7.8	55	70.7
8	9.1	56	72.1
9	10.5	57	73.4
10	11.8	58	74.7
11	13.1	59	76
12	14.5	60	77.3
13	15.7	61	78.6
14	17	62	79.9
15	18.3	63	81.2
16	19.6	64	82.5
17	21	65	83.8
18	22.3	66	85.2
19	23.6	67	86.2
20	24.9	68	87.8
21	26.2	69	89.1
22	27.5	70	90.4
23	28.8	71	91.7
24	30.1	72	93
25	31.5	73	94.3
26	32.7	74	95.6
27	34	75	96.9
28	35.4	76	98.3
29	36.7	77	99.6
30	38	78	100.9
31	39.3	79	102.2
32	40.6	80	103.5
33	41.9	81	104.8
34	43.2	82	106.1
35	44.5	83	107.4
36	45.8	84	108.7
37	47.1	85	110
38	48.5	86	111.4
39	49.8	87	112.7
40	51.1	88	114
41	52.4	89	115.3
42	53.7	90	116.6
43	55	91	117.9
44	56.3	92	119.2
45	57.6	93	120.5
46	59	94	121.8
47	60.2	95	123.1
48	61.6	96	124.5

Lampiran 7

Hasil pengukuran keluaran panel sel surya

Pengukuran I

waktu	Panel 1		Panel 2		Panel 1	Panel 2
	V (Volt)	I (mA)	V (Volt)	I (mA)	P1 (watt)	P2 (watt)
8:20	8	75	6	50	0.6	0.3
8:25	8	75	6	55	0.6	0.33
8:30	7.6	70	6.2	57	0.532	0.3534
8:35	7.8	73	6.4	55	0.5694	0.352
8:40	7.8	73	6.4	57	0.5694	0.3648
8:45	7.6	72	6.6	62	0.5472	0.4092
8:50	7.8	75	6.8	65	0.585	0.442
8:55	7.8	75	7	66	0.585	0.462
9:00	8	75	7.1	65	0.6	0.4615
9:05	7.8	74	7.2	65	0.5772	0.468
9:10	7.9	75	7.2	65	0.5925	0.468
9:15	7.8	73	7.2	66	0.5694	0.4752
9:20	7.8	74	7.4	68	0.5772	0.5032
9:25	7.8	73	7.4	69	0.5694	0.5106
9:30	7.7	73	7.4	70	0.5621	0.518
9:35	7.8	74	7.6	70	0.5772	0.532
9:40	7.8	74	7.6	70	0.5772	0.532
9:45	7.7	73	7.5	71	0.5621	0.5325
9:50	7.8	74	7.6	71	0.5772	0.5396
9:55	7.8	74	7.7	70	0.5772	0.539
10:00	7.8	73	7.6	72	0.5694	0.5472
10:05	7.8	75	7.7	73	0.585	0.5621
10:10	7.9	75	7.8	73	0.5925	0.5694
10:15	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:20	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:25	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:30	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:35	7.7	73	7.8	73	0.5621	0.5694
10:40	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:45	7.7	73	7.8	73	0.5621	0.5694
10:50	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
10:55	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
11:00	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
11:05	7.8	74	7.9	75	0.5772	0.5925
11:10	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
11:15	7.8	70	7.8	72	0.546	0.5616
11:20	7.9	74	7.8	75	0.5846	0.585
11:25	7.8	74	8	75	0.5772	0.6
11:30	7.9	73	8	74	0.5767	0.592
11:35	7.7	70	7.8	73	0.539	0.5694
11:40	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
11:45	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
11:50	7.8	70	7.8	73	0.546	0.5694
11:55	7.8	73	7.9	74	0.5694	0.5846
12:00	7.9	73	8	74	0.5767	0.592
12:05	7.9	73	8	74	0.5767	0.592

12:10	7.9	73	7.9	73	0.5767	0.5767
12:15	7.8	71	7.9	73	0.5538	0.5767
12:20	7.9	73	7.9	73	0.5767	0.5767
12:25	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
12:30	8	73	8	73	0.584	0.584
12:35	7.8	73	7.8	73	0.5694	0.5694
12:40	7.6	70	7.6	70	0.532	0.532
12:45	7.8	73	7.8	72	0.5694	0.5616
12:50	7.8	73	7.8	70	0.5694	0.546
12:55	7.8	72	7.7	70	0.5616	0.539
13:00	7.8	70	7.6	70	0.546	0.532
13:05	7.7	70	7.5	68	0.539	0.51
13:10	7.8	72	7.6	69	0.5616	0.5244
13:15	7.8	70	7.5	68	0.546	0.51
13:20	7.6	70	7.2	65	0.532	0.468
13:25	8	73	7.6	68	0.584	0.5168
13:30	8	73	7.5	68	0.584	0.51
13:35	7.8	70	7.5	65	0.546	0.4875
13:40	7.7	70	7.4	65	0.539	0.481
13:45	7.6	70	7.2	65	0.532	0.468
13:50	7.6	70	7	62	0.532	0.434
13:55	7.6	70	7	63	0.532	0.441
14:00	7.6	70	6.8	60	0.532	0.408
14:05	7.4	70	6.6	60	0.518	0.396
14:10	7.5	70	6.6	60	0.525	0.396
14:15	7.5	63	6.4	58	0.4725	0.3712
14:20	7.6	70	6.4	58	0.532	0.3712
14:25	7.4	68	6.2	55	0.5032	0.341
14:30	7.3	68	5.8	50	0.4964	0.29
14:35	7.4	65	5.8	50	0.481	0.29
14:40	7.2	65	5.5	45	0.468	0.2475
14:45	7	65	4.3	45	0.455	0.1935
14:50	6.2	53	4.4	35	0.3286	0.154
14:55	4.8	35	3.4	25	0.168	0.085
15:00	4	40	2.8	25	0.16	0.07
15:05	2	60	1.6	40	0.12	0.064
15:10	5	16	3.3	11	0.08	0.0363
15:15	5.6	23	4.3	14	0.1288	0.0602
15:20	6.6	23	4.4	25	0.1518	0.11
15:25	6.4	55	4.4	35	0.352	0.154
15:30	6.4	55	4.2	35	0.352	0.147
15:35	5.5	48	3.3	28	0.264	0.0924
15:40	3.6	35	2.6	20	0.126	0.052
15:45	3.8	25	2.4	20	0.095	0.048
15:50	5.5	50	3.2	25	0.275	0.08
15:55	4	30	2	15	0.12	0.03

Pengukuran II

	Panel 1		Panel 2		Panel 1	Panel 2
waktu	V (Volt)	I (mA)	V (Volt)	I (mA)	P1(Watt)	P2 (Watt)
6:30	1.2	10	1	10	0.012	0.01
6:35	2	15	1.5	12	0.03	0.018
6:40	4	40	2	20	0.16	0.04
6:45	5	50	2.4	25	0.25	0.06
6:50	5.6	70	2.8	30	0.392	0.084
6:55	6.4	65	3.6	35	0.416	0.126
7:00	6.4	65	4	35	0.416	0.14
7:05	7.2	70	4.4	45	0.504	0.198
7:10	7.4	70	4.8	45	0.518	0.216
7:15	7.4	70	4.8	45	0.518	0.216
7:20	7.4	70	4.8	45	0.518	0.216
7:25	7.4	70	4.8	45	0.518	0.216
7:30	6.6	70	4.8	45	0.462	0.216
7:35	7	70	5.5	40	0.49	0.22
7:40	7.6	75	5.4	50	0.57	0.27
7:45	7.6	75	5.4	50	0.57	0.27
7:50	7.6	75	5.6	55	0.57	0.308
7:55	7.8	75	5.8	55	0.585	0.319
8:00	8	77	6.2	60	0.616	0.372
8:05	8	75	6.4	60	0.6	0.384
8:10	8	75	6.4	60	0.6	0.384
8:15	8	80	6.6	65	0.64	0.429
8:20	7.8	75	6.2	60	0.585	0.372
8:25	8.2	80	6.8	65	0.656	0.442
8:30	8	80	6.8	65	0.64	0.442
8:35	7.8	75	6.6	65	0.585	0.429
8:40	8	77	6.8	65	0.616	0.442
8:45	8	80	7	70	0.64	0.49
8:50	7.8	77	7	70	0.6006	0.49
8:55	8	80	7.4	70	0.64	0.518
9:00	8.2	80	7.6	75	0.656	0.57
9:05	8.2	80	7.8	75	0.656	0.585
9:10	8.5	80	8.5	80	0.68	0.68
9:15	8.5	80	8.2	80	0.68	0.656
9:20	8.4	80	8	80	0.672	0.64
9:25	8.6	85	8.4	80	0.731	0.672
9:30	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
9:35	8.5	80	8.2	80	0.68	0.656
9:40	8.4	80	8	80	0.672	0.64
9:45	8.5	80	8.2	80	0.68	0.656
9:50	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
9:55	8.4	85	8.4	82	0.714	0.6888
10:00	8	80	8.2	80	0.64	0.656
10:05	9	85	8.8	85	0.765	0.748
10:10	9	85	8.8	85	0.765	0.748

10:15	6.2	63	5.5	60	0.3906	0.33
10:20	7.8	75	7.8	75	0.585	0.585
10:25	8	75	8	75	0.6	0.6
10:30	9	85	9	85	0.765	0.765
10:35	8.5	85	8.4	80	0.7225	0.672
10:40	8.8	85	9	85	0.748	0.765
10:45	6.2	60	6.4	60	0.372	0.384
10:50	8.5	80	8.5	80	0.68	0.68
10:55	8.5	80	8.5	80	0.68	0.68
11:00	8.4	80	8.6	80	0.672	0.688
11:05	5	48	5.4	50	0.24	0.27
11:10	9	82	9.2	82	0.738	0.7544
11:15	8	75	8	75	0.6	0.6
11:20	8.6	80	8.6	80	0.688	0.688
11:25	8.2	80	8.4	82	0.656	0.6888
11:30	8.4	82	8.6	84	0.6888	0.7224
11:35	8	84	8	82	0.672	0.656
11:40	8.8	85	9	85	0.748	0.765
11:45	8	75	8.4	78	0.6	0.6552
11:50	8.8	75	9	80	0.66	0.72
11:55	8.5	80	8.6	80	0.68	0.688
12:00	8.5	80	8.5	85	0.68	0.7225
12:05	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
12:10	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
12:15	8.4	85	8.4	85	0.714	0.714
12:20	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:25	8.6	85	8.6	85	0.731	0.731
12:30	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:35	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:40	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:45	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:50	8.4	80	8.4	80	0.672	0.672
12:55	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
13:00	8.2	75	8.2	75	0.615	0.615
13:05	8.8	85	8.8	85	0.748	0.748
13:10	8	80	8	80	0.64	0.64
13:15	8.8	85	8.8	85	0.748	0.748
13:20	8.2	80	8.2	80	0.656	0.656
13:25	8.4	80	8.2	80	0.672	0.656
13:30	8.8	85	8.4	85	0.748	0.714
13:35	8.8	85	8.6	85	0.748	0.731
13:40	9	85	8.6	80	0.765	0.688
13:45	8	80	8	80	0.64	0.64
13:50	7.2	70	7	65	0.504	0.455
13:55	7.2	70	7	65	0.504	0.455
14:00	7.2	70	7	65	0.504	0.455
14:05	8	80	7.8	75	0.64	0.585
14:10	8	80	7.6	75	0.64	0.57

14:15	8	75	7.6	70	0.6	0.532
14:20	7.8	75	7	70	0.585	0.49
14:25	7.8	75	7	70	0.585	0.49
14:30	7.2	70	6.4	65	0.504	0.416
14:35	7	70	6.2	60	0.49	0.372
14:40	7.2	70	6.4	65	0.504	0.416
14:45	6	55	5.4	50	0.33	0.27
14:50	6	55	5.2	50	0.33	0.26
14:55	6	55	5.2	60	0.33	0.312
15:00	6.4	65	5.2	50	0.416	0.26
15:05	6	55	5	45	0.33	0.225

Lampiran 8

Perhitungan Energi yang digunakan sistem pelacak

Arus pada masing-masing pin saat bekerja adalah

$$\text{Pin 1} = 2,76 \cdot 10^{-4} \text{ Amper}$$

$$\text{Pin 2} = 3,92 \cdot 10^{-4} \text{ Amper}$$

$$\text{Pin 3} = 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ Amper}$$

$$\text{Pin 4} = 3,92 \cdot 10^{-4} \text{ Amper}$$

Dengan demikian daya pada masing-masing pin adalah

$$\text{Pin 1} = 2,76 \cdot 10^{-4} \text{ Amper} \times 5 \text{ volt} = 0,138 \text{ watt}$$

$$\text{Pin 2} = 3,92 \cdot 10^{-4} \text{ Amper} \times 5 \text{ volt} = 0,196 \text{ watt}$$

$$\text{Pin 3} = 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ Amper} \times 5 \text{ volt} = 0,1965 \text{ watt}$$

$$\text{Pin 4} = 3,92 \cdot 10^{-4} \text{ Amper} \times 5 \text{ volt} = 0,196 \text{ watt}$$

$$\text{Total daya yang diperlukan adalah} = 0,7265 \text{ watt}$$

Untuk bergerak satu step ($1,31^0$) diperlukan 42,21 detak (10,55 siklus) pergeseran pulsa pada input motor stepper. Setiap detak pulsa membutuhkan waktu 2000 μs .

sehingga untuk bergerak $1,31^0$ diperlukan waktu 0,0211 sekon untuk tiap-tiap pin.

Dengan demikian konsumsi energi yang diperlukan adalah:

$$\text{Pin 1} = 0,138 \text{ watt} \times 0,0211 \text{ sekon} = 2,9118 \cdot 10^{-3} \text{ joule}$$

$$\text{Pin 2} = 0,196 \text{ watt} \times 0,0211 \text{ sekon} = 4,1356 \cdot 10^{-3} \text{ joule}$$

$$\text{Pin 3} = 0,1965 \text{ watt} \times 0,0211 \text{ sekon} = 4,1462 \cdot 10^{-3} \text{ joule}$$

$$\text{Pin 4} = 0,196 \text{ watt} \times 0,0211 \text{ sekon} = 4,1356 \cdot 10^{-3} \text{ joule}$$

$$\text{Total energi yang diperlukan tiap step adalah} = 1,5329 \cdot 10^{-2} \text{ joule}$$

Total energi yang diperlukan selama pengukuran I adalah

$$1,5329 \cdot 10^{-2} \text{ joule} \times 91 \text{ step} = 1,3949 \text{ joule}$$

Total energi yang diperlukan selama pengukuran II adalah

$$1,5329 \cdot 10^{-2} \text{ joule} \times 103 \text{ step} = 1,5788 \text{ joule}$$

Lampiran 9

Perhitungan efisiensi panel sel surya

$$h = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{(I_{Radiasi})(A_{Panel})} \times 100\%$$

$$h = \frac{22.10^{-3} \times 6,9}{(63,09)(1,26.10^{-1} \times 1,04.10^{-1})} \times 100\%$$

$$h = \frac{0,1518}{0,8267} \times 100\%$$

$$h = 18,36\%$$