

**Pengaruh penambahan reflektor
Terhadap karakteristik arus-tegangan dan efisiensi sel surya**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Syarat Guna Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin



disusun oleh :

**Dwi Mulyono
I.0498060**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2003
PENGARUH PENAMBAHAN REFLEKTOR**

**TERHADAP KARAKTERISTIK ARUS-TEGANGAN
DAN EFISIENSI SEL SURYA**

Disusun oleh :

Dwi Mulyono
NIM : I 0498060

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Tri Istanto, ST., MT.
NIP. 132 282 194

Rendy Adhi Rachmanto, ST.
NIP. 132 282 690

Telah dipertahankan di hadapan dosen penguji pada hari Jum'at tanggal 24 Oktober 2003 :

1. Zainal Arifin, ST., MT :.....
NIP. 132 258 060
2. D. Danardono, ST. :.....
NIP. 132 238 502
3. R. Lulus Lambang, ST., MT. :.....
NIP. 132 282 193

Mengetahui

Pembantu Dekan I
FT – UNS

Ketua Jurusan Teknik Mesin
FT – UNS

Ir. Paryanto, MS
NIP. 131 569 244

Ir. Agustinus Sujono, MT
NIP. 131 472 632

ABSTRAK

Berbagai macam perlakuan yang diberikan pada sel surya menggambarkan upaya peningkatan daya keluaran sel surya dan efisiensi sel surya. Dalam penelitian berikut ini akan dianalisis perbedaan daya keluaran dan efisiensi sel surya yang telah mendapat perlakuan yang berbeda.

Perlakuan pada sel surya yang akan dianalisa dalam penelitian ini adalah penambahan reflektor pada sel surya dengan sudut kemiringan reflektor 90° dan 60° , sebagai bentuk variasi penguatan radiasi. Gagasan utama dari pemakaian reflektor adalah untuk meningkatkan perolehan radiasi masukan sel surya.

Setelah dilakukan pengujian, daya keluaran yang dihasilkan sel surya meningkat seiring dengan meningkatnya penerimaan radiasi oleh sel surya dan efisiensi sel surya turun seiring dengan kenaikan temperatur sel surya.

Kata kunci : sel surya, reflektor, radiasi masukan, daya keluaran, efisiensi.

ABSTRACT

Various treatment applied to the solar cell depicted an effort of its output power increase and its efficiency. The research would analyze the differences of output power and efficiency of solar cell, which had been treated differently.

The treatment analyzed in this research was an increment of reflector to solar cell with 90° and 60° in slope as a shape of radiation reinforcement variation. The main idea of the reflector use was to reinforce the input of solar cell's radiation.

After testing, the output power resulted from solar cell increased along with the input increase of solar cell's radiation and the efficiency solar cell decreased along with the increase of solar cell's temperature.

Keyword : solar cell, reflector, input radiation, output power, efficiency.



MOTTO

Bahagiakan orang lain jika ingin bahagia

Hidup adalah perjuangan tanpa henti

Bikin hidup lebih hidup

Persembahan

Buat ibuku semoga engkau tahu

Buat bapak semoga tidak sia-sia pengorbananmu.

Buat ibu dirumah sayangi bapakku

Buat calon istri yang dipilhkan tuhan untukku



KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Berkat rahmat dan hidayah-Nya jua tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini tak mungkin terselesaikan tanpa bantuan serta bimbingan banyak pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu dalam kesempatan ini penulis hendak menyampaikan terima kasih yang mendalam kepada :

1. Bapak Ir.Agustinus Sujono, MT., selaku ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret
2. Bapak Tri Istanto, ST.MT., selaku dosen pembimbing I dalam pembuatan tugas akhir ini.
3. Bapak Rendy Adi Rachmanto, ST.MT., selaku dosen pembimbing II dalam pembuatan tugas akhir ini.
4. Bapak Bambang Kusharjanta, ST.MT, selaku dosen pembimbing akademik.
5. Bapak Wahyu Purbo, ST. MT., selaku koordinator Tugas akhir.
6. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Mesin FT– UNS.
7. Ibu dan Bapak atas segala sesuatu yang telah engkau berikan.
8. Dek Herawati atas semua do'amu.
9. Gumilang dan Gilang untuk keramaian kalian.
10. Keluarga bapak Hidayat atas titipan-titipan dan makanannya.
11. Metri & Very atas semua waktu, tenaga, pemikiran, saran, komentarnya, serta keluarga besar pak Wido atas kostumnya.
12. Cah “Himagilasurya“ (selamatkan dunia dengan energi surya) : Adi (code-x), Aji, Edi, Joko, Kokoh, Mbabaangg.
13. Seluruh rekan-rekan Mahasiswa Teknik Mesin FT-UNS angkatan 1998, yang telah banyak membantu dalam pembuatan tugas akhir ini yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.
14. Dan semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya tugas akhir ini tepat pada waktunya yang tidak dapat kami sebut satu persatu.

Penulis menghaturkan terima kasih yang mendalam atas segenap bantuan yang telah diberikan. Semoga Allah SWT berkenan memberikan balasan-Nya.

Penulis juga mengucapkan permohonan maaf apabila dalam penulisan Tugas Akhir ini masih ada kesalahan dan kekurangan. Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini dan juga untuk pembuatan Tugas Akhir di masa yang akan datang

Surakarta, Oktober 2003

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR GRAFIK	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Pengaruh Tingkat Radiasi Pada Karakteristik Sel Surya	1
1.3. Permasalahan	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Tujuan Penelitian	2
1.6. Manfaat Penelitian	2
1.7. Sistematika Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1. Tinjauan Pustaka	4
2.2. Konstanta Surya	4
2.3. Jenis Radiasi Matahari	5
2.4. Pengaruh Posisi Bumi Terhadap Matahari	6
2.5. Perbandingan Radiasi Langsung pada Bidang Miring Terhadap Permukaan Horisontal	8
2.6. Radiasi Ekstraterrestrial pada Permukaan Horisontal	8
2.7. Distribusi Radiasi Matahari Jam dengan Cuaca Cerah dan Berawan	8
2.8. Komponen Radiasi Langsung dan Sebaran Per Jam	9
2.9. Radiasi pada Bidang Miring dengan Metode Isotropic Sky	9

2.10. Perhitungan Radiasi Permukaan Miring pada Sistem Sel Surya - Reflektor	9
2.11. Pemodelan Sel Surya	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1. Peralatan Penelitian	15
3.1.1. Sel Surya	15
3.1.2. Reflektor	15
3.1.3. Alat Ukur	16
3.2. Skema Alat Penelitian	16
3.2.1. Skema Alat Sel Surya yang Berdiri Sendiri	16
3.2.2. Skema Alat Sel Surya Dengan Penambahan Reflektor	17
3.2.3. Skema Penempatan Titik Pengukuran Temperatur	18
3.2.4. Dimensi Penempatan Sel Surya dan Reflektor Pada Rangka Kayu	19
3.3. Jalan Penelitian	20
3.4. Diagram Alir Perhitungan	22
3.4.1 Perhitungan Radiasi Masukan Tanpa Reflektor	22
3.4.2 Perhitungan Radiasi Masukan Dengan Reflektor	23
3.4.3 Perhitungan Arus dan Tegangan Teoritis	26
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Data Penelitian	28
4.2.1. Data Referensi	28
4.2.2. Data Percobaan	28
4.2. Analisa Data	28
4.2.1. Perhitungan Faktor Bentuk Sel Surya Reflektor	28
4.2.2. Perhitungan Radiasi Masukan Karena Penambahan Reflektor	32
4.2.2.1. Perhitungan Akibat Gerak Semu Harian Matahari	32
4.2.2.2. Perhitungan Komponen Radiasi Masukan Sistem	37
4.2.2.3. Perhitungan Pada Sistem Reflektor Sel – Surya	40
4.2.2.4. Menentukan Faktor Bentuk	43
4.2.2.5. Menentukan Radiasi Yang Menimpa	

Akibat Penguatan Reflektor	44
4.2.3. Perhitungan Pasangan Arus Dan Tegangan Teoritis	46
4.2.4. Perhitungan Efisiensi Elektris	48
4.2.4.1. Perhitungan Efisiensi Teoritis	48
4.2.4.2. Perhitungan Efisiensi Aktual	49
4.3. Pembahasan	51
4.3.1 Analisa Sistem Sel Surya-Reflektor	51
4.3.2 Analisa Pengaruh Reflektor Terhadap Temperatur Sel Surya	53
4.3.3 Analisa Pengaruh Penambahan Reflektor Terhadap Daya Keluaran Sel Surya	54
4.3.4 Analisa Efisiensi Sistem Penelitian	55

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran	59

DAFTAR PUSTAKA	60
-----------------------------	----

LAMPIRAN

1. Data Referensi
2. Data Percobaan
3. Grafik Faktor Bentuk Kolektor – Reflektor
4. Grafik Karakteristik Arus – Tegangan Aktual dan Teoritis
5. Grafik karakteristik Arus – Tegangan dan Daya – Tegangan pada radiasi bidang horisontal yang relatif sama.
6. Kalibrasi sensor suhu
7. Spec Sheet BP-255
8. Program perhitungan penguatan reflektor.
9. Program karakteristik arus-tegangan

DAFTAR GAMBAR

Gambar.1.1. Pengaruh tingkat radiasi pada I-V sel surya	1
Gambar.2.1. Hubungan geometris bumi-matahari	5
Gambar.2.2. Jenis radiasi matahari yang mengenai permukaan	5
Gambar.2.3. Beberapa sudut penting dalam energi surya.	6
Gambar.2.4. Proyeksi sistem pada bidang utara selatan dan bidang horisontal	11
Gambar.2.5. Rangkaian ekuivalen sel surya	12
Gambar.3.1. Rangkaian percobaan pada sistem sel surya berdiri sendiri...	16
Gambar.3.2. Rangkaian percobaan sistem PV dengan penambahan reflektor	17
Gambar.3.3. Skema penempatan titik pengukuran temperatur	18
Gambar.3.4. Skema penempatan sel surya dan reflektor pada rangka kayu	19
Gambar.4.1. Geometri sistem PV–Reflektor yang diteliti	28
Gambar.4.2. Sketsa Sistem PV dengan reflektor yang diteliti.....	29
Gambar.4.3. Dimensi reflektor dan sel surya	29
Gambar.4.4. Susunan umum faktor bentuk F_{C-CR1}	30
Gambar.4.5. Proyeksi sistem kebidang utara selatan dan horisontal	41
Gambar.4.6. Proyeksi sistem sel surya-reflektor 90° ke bidang utara selatan	51
Gambar.4.7. Proyeksi sistem sel surya-reflektor 60° ke bidang utara selatan	52
Gambar.4.8. Pengaruh <i>ground reflected</i> pada sel surya	52
Gambar.4.9. Pengurangan radiasi hambur (<i>diffuse</i>) ke sel surya pada reflektor 90°	53
Gambar.4.10. Pengurangan radiasi hambur (<i>diffuse</i>) ke sel surya pada reflektor 60°	53

DAFTAR GRAFIK

Grafik.4.1. Hubungan temperatur sel surya terhadap radiasi bidang horisontal	54
Grafik.4.2. Hubungan daya keluaran terhadap radiasi masukan sistem	55
Grafik.4.3. Hubungan efisiensi terhadap radiasi masukan sistem	55
Grafik.4.4. Karakteristik arus – tegangan pada radiasi masukan $\pm 700 \text{ W/m}^2$	56
Grafik.4.5. Karakteristik daya – tegangan pada radiasi masukan $\pm 700 \text{ W/m}^2$	56
Grafik Faktor bentuk kolektor - sel surya	Lampiran 3
Grafik Perbandingan karakteristik arus – tegangan aktual dan teoritis seluruh data penelitian	Lampiran 4
Grafik karakteristik arus – tegangan dan daya – tegangan pada radiasi bidang horisontal yang relatif sama	Lampiran 5
Grafik kalibrasi sensor suhu	Lampiran 6

DAFTAR TABEL

Tabel .4.1. Faktor bentuk F_{C-DR2} dan F_{D-R2}	30
Tabel .4.2. Faktor bentuk F_{R2-CD} , F_{R2-D} dan F_{R2-C}	30
Tabel .4.3. Faktor bentuk F_{C-R2}	30
Tabel .4.4. Hasil perhitungan komponen F_{C-R1}	31
Tabel .4.5. Hasil perhitungan K	32
Tabel .4.6. Hasil perhitungan faktor bentuk F_{C-R} total	32
Tabel .4.7. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya berdiri sendiri	36
Tabel .4.8. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya dengan reflektor 90°	36
Tabel .4.9. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya dengan reflektor 60°	37
Tabel .4.10. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan sistem untuk sel surya berdiri sendiri	38
Tabel .4.11. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan sistem untuk sel surya dengan reflektor 90°	39
Tabel .4.12. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan sistem untuk sel surya dengan reflektor 60°	39
Tabel .4.13. Hasil perhitungan sistem sel surya – reflektor untuk sel surya dengan reflektor 90°	42
Tabel .4.14. Hasil perhitungan sistem sel surya – reflektor untuk sel surya dengan reflektor 60°	43
Tabel .4.15. Perolehan radiasi yang diterima setelah ada penguatan reflektor untuk sel surya dengan reflektor 90°	45
Tabel .4.16. Perolehan radiasi yang diterima setelah ada penguatan reflektor untuk sel surya dengan reflektor 60°	46
Tabel .4.17. Efisiensi sel surya yang berdiri sendiri	49
Tabel .4.18. Efisiensi sel surya dengan reflektor 90°	50
Tabel .4.19. Efisiensi sel surya dengan reflektor 60°	50
Tabel Data Hasil percobaan	Lampiran 2

DAFTAR SIMBOL

a	: <i>Curve fitting parameter</i>	
A_c	: Luas permukaan sel surya	(m ²)
AR_{ns}	: Rasio luasan yang terkena radiasi <i>beam</i> langsung	
A_r	: Luas reflektor	(m ²)
AR_r	: Rasio luasan yang terkena pantulan <i>beam</i>	
F_{c-g}	: Faktor bentuk kolektor tanah	
F_{c-r}	: Faktor bentuk kolektor reflektor	
F_{c-s}	: Faktor bentuk kolektor langit	
F_{r-c}	: Faktor bentuk reflektor kolektor	
F_{r-g}	: Faktor bentuk reflektor tanah	
F_{r-s}	: Faktor bentuk reflektor langit	
G	: Radiasi masukan sistem	(W/m ²)
G_b	: Radiasi langsung (<i>beam</i>) pada permukaan datar	(W/m ²)
$G_{b,n}$: Radiasi langsung pada arah normal	(W/m ²)
$G_{b,t}$: Radiasi langsung pada permukaan miring	(W/m ²)
G_d	: Radiasi hamburan langit (<i>diffuse</i>)	(W/m ²)
G_o	: Radiasi ekstraterrestrial	(W/m ²)
G_{sc}	: Konstanta surya	(W/m ²)
I	: Arus keluaran	(Ampere)
I_L	: Arus cahaya	(Ampere)
I_{mp}	: Arus daya maksimum	(Ampere)
I_o	: <i>Diode reverse saturation current</i>	(Ampere)
I_{sc}	: Arus hubungan pendek	(Ampere)
I_T	: Radiasi yang menimpa pada bidang miring	(W/m ²)
\bar{K}_T	: Indeks kecerahan langit harian	
k_T	: Indeks kecerahan langit sesaat	
L_c	: Panjang sel surya	(m)
L_{loc}	: Bujur lokal	(Derajat)
L_r	: Panjang <i>hinge</i> reflektor	(m)
L_{st}	: Bujur standart	(Derajat)
n	: Hari ke-n pada satu tahun	

N_s	: Jumlah sel seri	
P	: Daya keluaran sel surya	(Watt)
P_{max}	: Daya maksimum	(Watt)
R_b	: Faktor geometri sel surya	
R_{br}	: Faktor geometri reflektor	
R_s	: Hambatan seri (<i>Series resistant</i>)	(ohm)
R_{sh}	: <i>Shunt resistant</i>	(ohm)
T_c	: Temperatur sel surya	(K)
V	: Tegangan keluaran	(Volt)
V_{mp}	: Tegangan daya maksimum	(Volt)
V_{oc}	: Tegangan rangkaian terbuka	(Volt)
$V(I)$: Tegangan fungsi arus	(Volt)
W_c	: Lebar sel surya	(m)
W_r	: Lebar reflektor	(m)
α_s	: Sudut altitute	(Derajat)
α_{NS}	: Proyeksi sudut altitute ke bidang utara selatan	(Derajat)
β	: Sudut kemiringan bidang	(Derajat)
β_c	: Sudut kemiringan sel surya	(Derajat)
β_r	: Sudut kemiringan reflektor	(Derajat)
δ	: Sudut deklinasi	(Derajat)
ε	: <i>Material bandgap energy</i>	
ϕ	: Sudut Latitude	(Derajat)
γ	: Sudut azimuth reflektor	(Derajat)
γ_s	: Sudut azimuth matahari	(Derajat)
η_{mp}	: Efisiensi daya maksimum aktual	(%)
$\eta_{mp,teoritis}$: Efisiensi daya maksimum teoritis	(%)
μ_{Voc}	: Koefisien temperatur tegangan rangkaian terbuka	(Volt K ⁻¹)
μ_{Isc}	: Koefisien temperatur arus hubungan pendek	(Ampere K ⁻¹)
θ	: Sudut datang radiasi langsung ke sel surya	(Derajat)
θ_r	: Sudut datang radiasi langsung ke reflektor	(Derajat)
θ_z	: Sudut zenith	(Derajat)

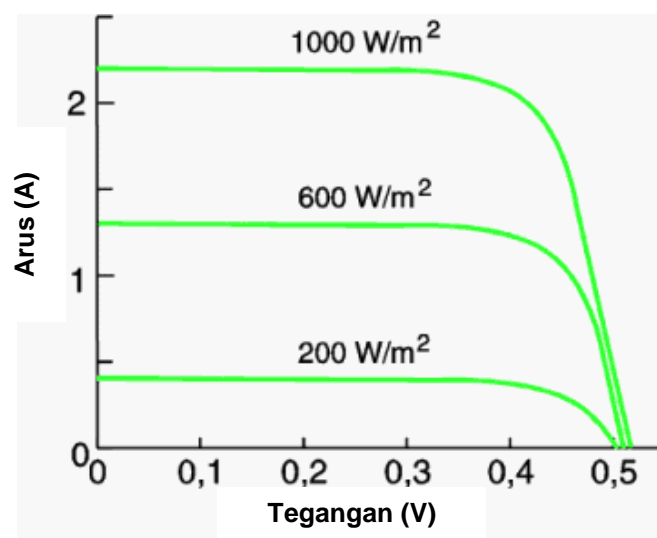
- ρ_g : Reflektansi tanah
- ρ_r : Reflektansi reflektor
- ω : Sudut jam (Derajat)
- ψ : Sudut sel surya dengan reflektor (Derajat)

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Dilihat dari tingkat ketersediannya maka sinar matahari adalah sumber energi yang paling berlimpah dibanding sumber energi lainnya. Sebanyak 5,6 juta exajoules energi surya mencapai atmosfer bumi setiap tahun, sekitar sepertiga dari energi itu dipantulkan kembali ke ruang angkasa, dengan 18% lainnya diserap oleh atmosfer banyak diantaranya diubah menjadi angin. Hal ini menyisakan sekitar 2,5 juta exajoules energi yang mencapai permukaan bumi. Selain tersedia dalam jumlah yang berlimpah energi surya memiliki kelebihan lain yaitu gratis, dan ramah lingkungan. Dengan demikian diperlukan kegiatan-kegiatan penelitian yang dapat meningkatkan pemanfaatan energi surya.

1.2. Pengaruh Tingkat Radiasi Pada Karakteristik Sel Surya



Gambar 1.1. Pengaruh tingkat radiasi pada I-V sel surya

Tegangan terminal hanya sedikit terpengaruh terhadap tingkat radiasi yang diterima sedangkan intensitas arus listrik akan meningkat dengan naiknya tingkat radiasi. Sebagai contoh sebuah sel silikon 100 cm^2 , mencapai arus maksimum sekitar 2 Ampere saat terkena radiasi 1000 W/m^2 .

1.3. Permasalahan

Berangkat dari karakteristik sel surya yang dipengaruhi oleh tingkat radiasi tersebut maka kegiatan penelitian yang dilakukan akan mempelajari permasalahan-permasalahan sbb:

1. Membandingkan karakteristik arus-tegangan (I-V) sel surya pada dua buah sistem.
Sistem I : sel surya yang berdiri sendiri.
Sistem II : sel surya telah mendapat penguatan radiasi dengan penambahan reflektor.
2. Menghitung perolehan radiasi yang diterima sel surya dan efisiensi listrik pada kedua sistem tersebut.

1.4. Batasan Masalah

Agar eksperimen dapat dilaksanakan secara seksama maka digunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut.

1. Penelitian dilaksanakan di Surakarta yang terletak pada $-7,6^\circ \text{ LS}$ dan $110,8^\circ \text{ BT}$.
2. Penelitian akan dilakukan pada kondisi steady state dimana tingkat radiasi dan kondisi lingkungan (temperatur udara dan kecepatan udara) relatif konstan.
3. Sel surya dalam posisi horisontal dan sudut kemiringan reflektor 60° untuk satu pengujian dan 90° untuk pengujian lain.

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian pengaruh penguatan radiasi masukan.

1. Mengetahui karakteristik I-V sel surya sebelum dan sesudah penambahan radiasi masukan.
2. Mengetahui perbandingan efisiensi dan daya yang dihasilkan kedua sistem.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan akan memberikan manfaat-manfaat sbb :

1. Peningkatan efisiensi dan daya keluaran sel surya.
2. Peningkatan pemanfaatan energi surya dalam suatu luasan permukaan.

1.7. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

- Bab I : Menjelaskan tentang latar belakang masalah, permasalahan, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian serta sistematika penulisan.
- Bab II : Meliputi tinjauan pustaka, dasar teori energi surya, pemodelan sel surya.
- Bab III : Meliputi langkah-langkah percobaan, peralatan yang digunakan, langkah pengambilan data dan diagram alir perhitungan.
- Bab IV : Menjelaskan tentang data yang diperoleh, perhitungan data, beberapa grafik penting dan analisa serta pembahasan hasil perhitungan.
- Bab V : Berisi tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

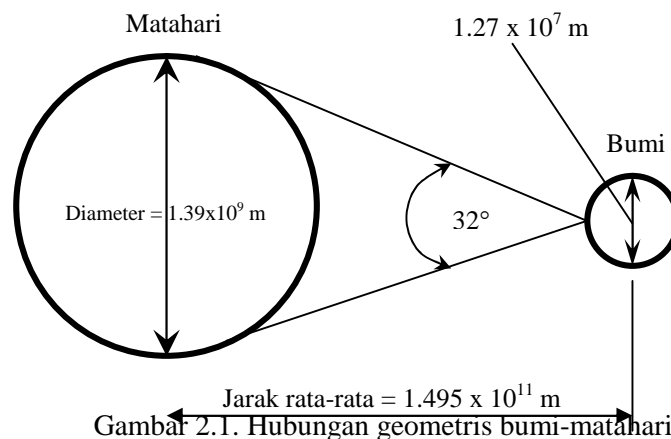
Joseph W. Bollentin memberikan analisis untuk konfigurasi kolektor dengan reflektor, dengan mengurangi beberapa asumsi yang digunakan oleh peneliti sebelumnya. Dalam analisisnya mencakup kontribusi radiasi hambur (*diffuse*) akibat penambahan reflektor, penggunaan dimensi kolektor dan reflektor yang oleh peneliti sebelumnya diasumsikan tak terhingga.

Y. Tripanagnostopoulos (2002) meneliti beberapa sistem PV/thermal, pada penelitian tersebut dikaji pengaruh tipe PV, fluida pemindah panas, pemakaian *cover* dan reflektor terhadap efisiensi termis dan efisiensi elektrik. Eksperimen dilaksanakan pada keadaan *steady state* dengan kriteria menurut Tripanagnostopoulos adalah kondisi radiasi pada *solar noon* ± 2 jam dengan $G \pm 20 \text{ W/m}^2$ dimana fraksi G_d hingga 25 %. Variasi $T_a \pm 1\text{K}$ dan $V_{\text{wind}} \pm 0.5 \text{ m/s}$ pada range 1 – 2 m/s dapat dianggap konstan untuk perhitungan dan evaluasi sistem, dengan laju aliran massa adalah 0,002 Kg/s. Hal penting yang dapat

diambil dari penelitian Tripanagnostopoulos adalah dengan penambahan reflektor dapat meningkatkan efisiensi elektrik.

2.2. Konstanta Surya

Hubungan geometris dari matahari-bumi ditunjukkan Gambar 2.1. Jarak eksentrisnya dari lintasan bumi adalah jarak antara matahari dan bumi dengan variasi 1,7%. Dari hasil pengukuran astronomi didapat jarak rata-rata bumi-matahari adalah $1,495 \times 10^{11}$ m, dengan sudut kecenderungan matahari 32° . Radiasi yang diemisikan oleh matahari dan ruang angkasa ke bumi menghasilkan intensitas radiasi matahari yang hampir konstan di luar atmosfer bumi. Konstanta matahari, G_{sc} , adalah energi dari matahari per unit waktu yang diterima pada satu unit luasan permukaan yang tegak lurus arah radiasi matahari pada jarak rata-rata matahari-bumi di luar atmosfer. World Radiation Center (WRC) mengambil nilai konstanta matahari, G_{sc} , sebesar 1367 W/m^2 , dengan ketidakpastian sebesar 1%.

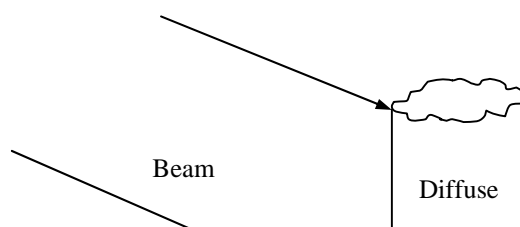


Konstanta radiasi ekstraterestrial, G_{on} , yaitu radiasi di luar atmosfer bumi yang diukur pada bidang normal terhadap radiasi pada hari ke-n pada satu tahun. Hal ini dikarenakan orbit bumi sebenarnya berbentuk elips, sehingga perlu sedikit koreksi terhadap konstanta matahari di atas. Jadi sebenarnya ada dua penyebab adanya variasi radiasi ekstraterestrial yaitu variasi radiasi yang diemisikan matahari dan variasi jarak matahari-bumi. Persamaannya [Wiliam A. Beckman Halaman 10] adalah :

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad \dots\dots\dots 2.1.)$$

2.3. Jenis-jenis Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang mengenai suatu kolektor di permukaan bumi dibedakan menjadi :

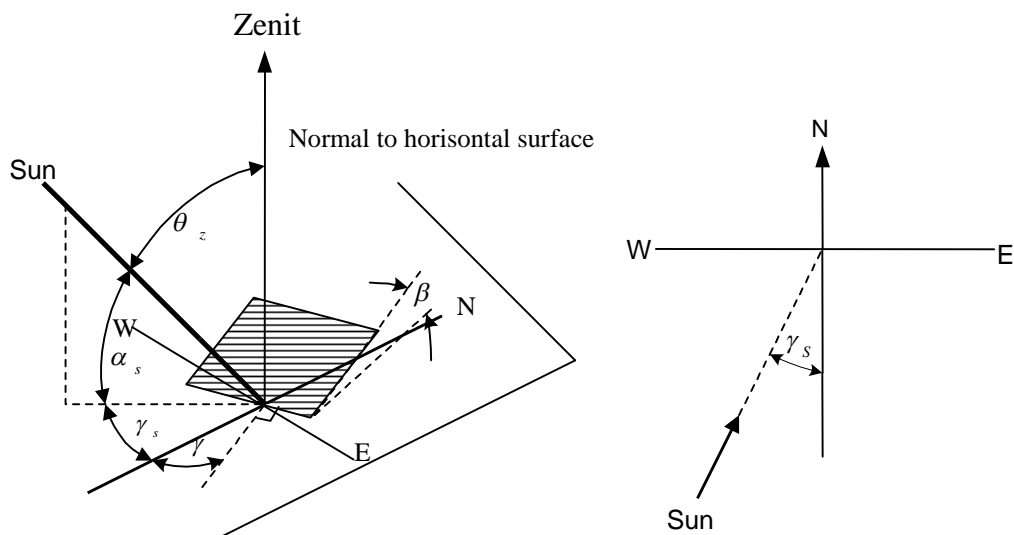


Gambar 2.2 Jenis radiasi matahari yang mengenai permukaan

1. Radiasi langsung (*beam*) : yaitu radiasi surya yang diterima dari matahari tanpa disebarkan oleh atmosfer.
2. Radiasi hambur (*diffuse*) : yaitu radiasi surya yang diterima dari matahari sesudah arahnya berubah setelah terpecah oleh atmosfer.
3. Radiasi pantulan tanah (*ground reflected*)
4. Radiasi total : yaitu penjumlahan dari radiasi *beam*, *diffuse* dan pantulan tanah.

2.4. Pengaruh Posisi Relatif Matahari Terhadap Bumi

Posisi relatif matahari terhadap suatu bidang di bumi bisa dinyatakan dalam beberapa sudut. Beberapa diantaranya bisa dilihat pada gambar 2.2. Sudut-sudut itu adalah:



Gambar 2.3. Beberapa sudut penting dalam energi surya.

- a. ϕ , *latitude* (garis lintang) : Sudut lokasi di sebelah utara atau selatan dari equator (khatulistiwa), utara positif ; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- b. δ , *declination* (deklinasi) : Sudut posisi matahari saat *solar noon* yang berhubungan terhadap bidang khatulistiwa, utara positif; $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$.
- c. β , *slope* (kemiringan) : Sudut antara permukaan bidang yang ditanyakan dengan permukaan horisontal ; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.
- d. γ , *surface azimuth angle* (sudut permukaan azimuth) : Proyeksi ke bidang horisontal normal terhadap permukaan dari lokasi bujur, dengan nol menghadap selatan, timur negatif, barat positif ; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.
- e. ω , *hour angle* (sudut jam) : Sudut penyimpangan matahari di sebelah timur atau barat garis bujur lokal karena rotasi pada porosnya sebesar 15° per jam ; sebelum jam 12.00 negatif, setelah jam 12.00 positif.
- f. θ , *angle of incidence* (sudut datang) : Sudut antara permukaan radiasi langsung normal vertikal terhadap radiasi langsung vertikal kolektor.
- g. θ_z , *zenith angle* (sudut zenith) : Sudut antara garis vertikal bidang normal dan garis datang sinar matahari.
- h. α_s , *solar altitude angle* (sudut ketinggian matahari) : Sudut antara garis horisontal dengan garis matahari datang.
- i. γ_s , *solar azimuth angle* (sudut azimuth matahari) : Sudut penyimpangan dari selatan dengan proyeksi radiasi langsung pada bidang horisontal. Penyimpangan ke sebelah timur adalah negatif dan ke sebelah barat adalah positif.

Sudut deklinasi bisa dihitung dengan rumus [Wiliam A. Beckman Halaman 13]:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284.n}{365} \right) \dots\dots\dots 2.2.)$$

di mana n : tanggal ke-n pada suatu tahun [Wiliam A. Beckman Halaman 14]

Persamaan yang menghubungkan antara sudut datang dari *beam radiation* pada permukaan kolektor (θ) dengan sudut lain [Wiliam A. Beckman Halaman 15] adalah :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \dots\dots\dots 2.3.)$$

untuk beberapa kasus khusus yaitu:

-) Permukaan vertikal, $\beta = 90^\circ$ [Wiliam A. Beckman Halaman 15] maka :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & -\sin \delta \cos \varphi \cos \gamma + \cos \delta \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2.4.)$$

•) permukaan horisontal, $\beta = 0^0$ [Wiliam A. Beckman Halaman 16] maka :

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad \dots\dots\dots 2.5.)$$

2.5. Perbandingan Radiasi Langsung pada Bidang Miring Terhadap Permukaan Horisontal

Untuk keperluan *design* dan perhitungan prestasi, sering dibutuhkan untuk menghitung data radiasi per jam dari kolektor permukaan miring yang berdasarkan pengukuran radiasi matahari pada permukaan horisontal. Data yang tersedia pada umumnya untuk total radiasi pada suatu jam atau hari adalah untuk permukaan horisontal. Untuk itu ada yang disebut dengan faktor geometris, R_b , yaitu perbandingan radiasi langsung pada bidang miring dengan permukaan horisontal ditiap waktu. Persamaannya [Wiliam A. Beckman Halaman 15] adalah:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad \dots\dots\dots 2.6.)$$

2.6. Radiasi Ekstraterrestrial pada Permukaan Horisontal

Pada suatu waktu (sembarang), radiasi surya yang mengenai permukaan horisontal di luar atmosfer adalah radiasi surya masuk normal dibagi dengan R_b (faktor geometris), persamaannya [Wiliam A. Beckman Halaman 40] adalah:

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360.n}{365} \right) \cos \theta_z \quad \dots\dots\dots 2.7.)$$

Kombinasi persamaan 2.5.) dengan persamaan 2.7.) menghasilkan G_o untuk permukaan horisontal pada sembarang waktu antara matahari terbit dan terbenam yaitu [Wiliam A. Beckman Halaman 40] :

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360.n}{365} \right) (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \quad \dots\dots 2.8.)$$

2.7. Distribusi Radiasi Matahari pada Suatu Hari dan Jam dengan Cuaca Cerah dan Berawan

Indeks kecerahan rata-rata \bar{K}_T , adalah perbandingan antara radiasi rata-rata pada permukaan horisontal terhadap radiasi rata-rata ekstraterrestrial. Dengan rumus [Wiliam A. Beckman Halaman 77]:

$$k_T = \frac{G}{G_o} \quad \dots\dots\dots 2.9.)$$

2.8. Komponen Radiasi Langsung dan Sebaran Per Jam

Pada bagian ini akan dijelaskan metode perhitungan untuk memisahkan *beam* dan *diffuse radiation* dari radiasi horisontal total. Pemisahan komponen ini diperlukan untuk menghitung radiasi total pada permukaan dengan orientasi yang berbeda dari data pada permukaan horisontal. Persamaan yang digunakan adalah [Wiliam A. Beckman Halaman 82]:

$$\frac{G_d}{G} = \begin{cases} 1,0 - 0,09.k_T & \text{untuk } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,01604.k_T + 4,388.k_T^2 \\ -16,638.k_T^3 + 12,336.k_T^4 & \text{untuk } 0,22 < k_T \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{untuk } k_T > 0,80 \end{cases} \quad \dots\dots 2.10.)$$

2.9. Radiasi pada Bidang Miring dengan Metode Isotropic Sky

Bisa diasumsikan bahwa kombinasi dari *diffuse* dan *ground reflected radiation* adalah isotropik. Dengan asumsi ini, penjumlahan *diffuse* dari langit dan radiasi pantulan tanah (*ground reflected radiation*) pada bidang miring adalah sama dengan mengabaikan orientasinya. Radiasi pada bidang miringnya dianggap mempunyai tiga komponen yaitu *beam*, *isotropic* dan *ground reflected radiation*. Sementara untuk *horizon* dan *circumsolar* dianggap nol karena semua *diffuse* dianggap isotropik. Persamaannya adalah [Wiliam A. Beckman Halaman 95]:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \dots\dots\dots 2.11.)$$

2.10. Perhitungan Radiasi Permukaan Miring pada Sistem Sel Surya-Reflektor

Salah satu cara untuk meningkatkan perolehan radiasi masukan adalah menggunakan reflektor. Pemodelan radiasi masukan pada sel surya yang diperkuat dengan reflektor datar menurut perumusan (Joseph W. Bollentin dan Richard D. Wilk) adalah :

$$G_{\text{Total}} = G_b R_b AR_{ns} + G_b R_{br} AR_r \rho_r + G_d F_{c-s} + G_d F_{r-s} \rho_r F_{c-r} + G \rho_g F_{c-g} + G \rho_g F_{r-g} \rho_r F_{c-r} \quad \dots\dots\dots 2.12.)$$

Suku-suku tersebut mewakili *direct beam* ke sel surya, *reflected beam* dari reflektor ke sel surya, *diffuse* ke sel surya, *reflected diffuse* dari reflektor ke sel surya, *ground reflected* ke sel surya, dan *reflected ground reflected* dari reflektor ke sel surya.

AR mewakili rasio luasan sel surya. AR_{ns} adalah luasan sel surya yang terkena *beam* dibagi dengan luasan total sel surya. AR_r adalah luasan sel surya yang terkena *reflected beam* dari reflektor dibagi luasan total sel surya, lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.4.

Untuk menghitung AR_{ns} dan AR_r dilakukan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut (Joseph W. Bollentin dan Richard D. Wilk) :

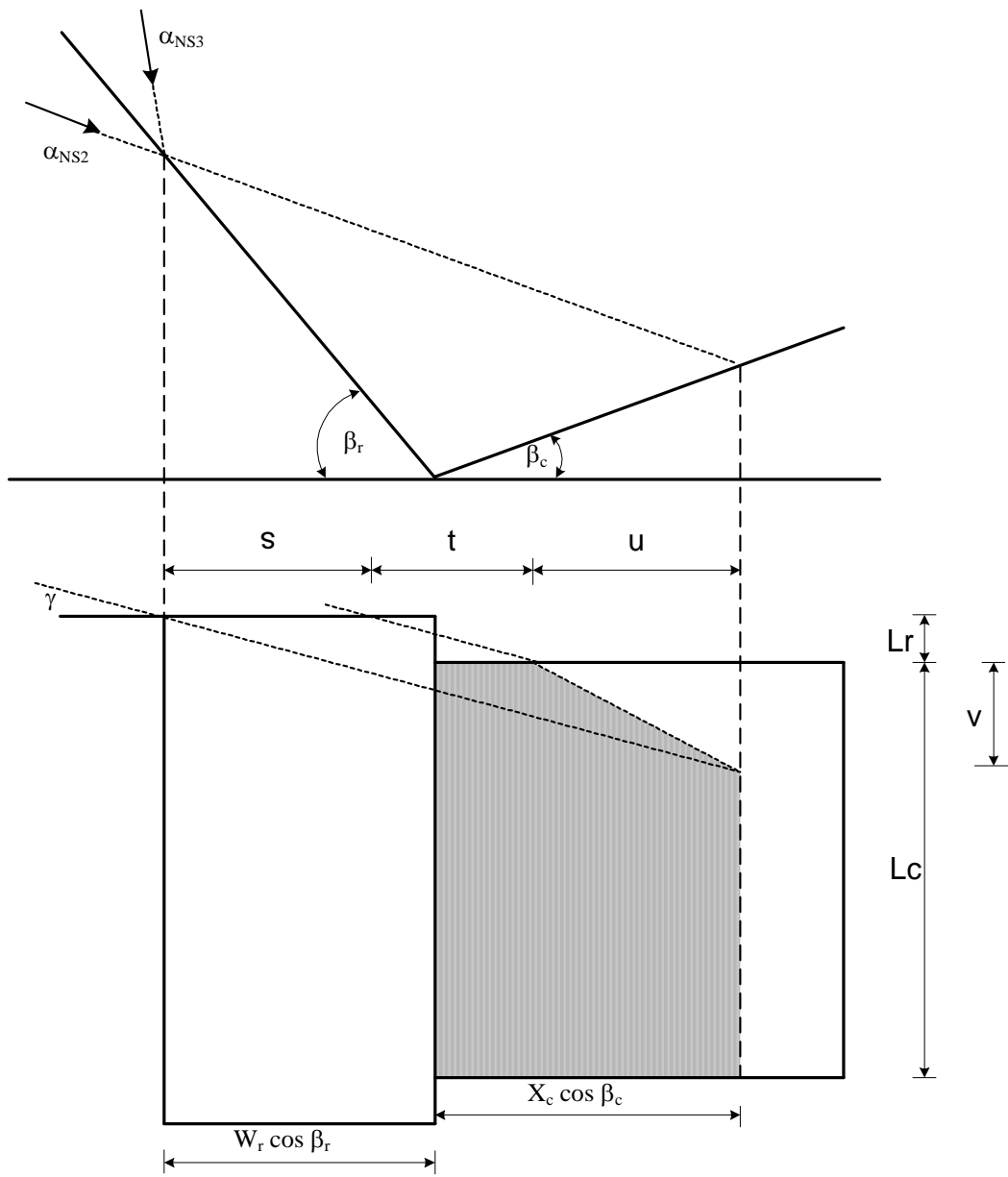
$$X_c = \frac{\{W_r \sin(\alpha_{NS} - \beta_r)\}}{\{\sin(2\beta_r + \beta_c - \alpha_{NS})\}} \quad \dots\dots\dots 2.13.)$$

$$v = \tan \gamma (W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c) - L_r \quad \dots\dots\dots 2.14.)$$

$$u = \frac{\{X_c \cos \beta_c (W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c - L_r / \tan \gamma)\}}{\{W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c\}} \quad \dots\dots\dots 2.15.)$$

$$AR_{ns} = \frac{W_c \cdot L_c - X_c \cdot L_c + \frac{u \cdot v}{2 \cos \beta_c}}{W_c \cdot L_c} \quad \dots\dots\dots 2.16.)$$

$$AR_r = \frac{X_c \cdot L_c - \frac{u \cdot v}{2 \cos \beta_c}}{W_c \cdot L_c} \quad \dots\dots\dots 2.17.)$$



Gambar. 2.4. Proyeksi sistem pada bidang utara selatan dan bidang horisontal

Untuk konfigurasi kolektor dengan reflektor maka menurut (Joseph W Bollentin dan Richard D. Wilk) perumusan berikut ini diperlukan untuk menghitung beberapa faktor bentuk yang diperlukan,

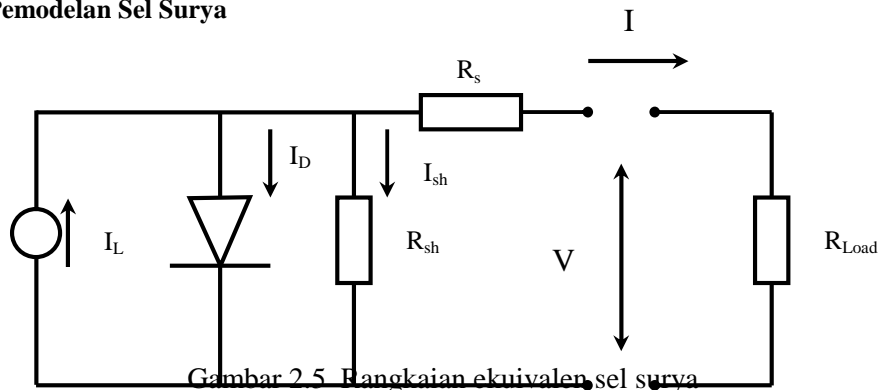
$$F_{c-s} = 0.5(1 + \cos \beta_c) - F_{c-r} \quad \dots\dots\dots 2.18.)$$

$$F_{R-s} = 0.5(1 + \cos \beta_r) \quad \dots\dots\dots 2.19.)$$

$$F_{C-g} = 0.5(1 - \cos \beta_c) \quad \dots\dots\dots 2.20.)$$

$$F_{R-g} = 0.5(1 - \cos \beta_r) - F_{R-c} \quad \dots\dots\dots 2.21.)$$

2.11. Pemodelan Sel Surya



Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen sel surya

Gambar 2.5 di atas adalah rangkaian ekuivalen yang dapat digunakan untuk sebuah sel, modul, atau array. Rangkaian tersebut memerlukan lima parameter yang harus diketahui, yaitu :

- I_L : Arus cahaya (*light current*)
- I_o : *Diode reverse saturation current*
- R_s : *Series resistance*
- R_{sh} : *Shunt resistance*
- a : *Curve fitting parameter*

Pada kondisi temperatur dan radiasi konstan, karakteristik arus-tegangan dari model rangkaian tersebut adalah [Wiliam A. Beckman Halaman 771] :

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_o \left\{ \exp\left[\frac{V + IR_s}{a}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad \dots\dots\dots 2.22.)$$

Persamaan Daya diberikan dengan [Wiliam A. Beckman Halaman 771]

$$P = I.V \quad \dots\dots\dots 2.23.)$$

Rauschenbach (1980) menunjukkan bahwa *shunt resistance* (R_{sh}) untuk kebanyakan sel surya modern berharga sangat besar sehingga suku terakhir pada persamaan 2.22 dapat diabaikan. Namun jika pada tegangan rendah kurva I-V memperlihatkan slope negatif dan bukan berupa garis yang hampir horisontal barulah *shunt resistance* perlu diperhitungkan.

Pada kondisi hubungan pendek (*short circuit*), arus dioda sangat kecil dan arus cahaya sama dengan arus hubungan pendek [Wiliam A. Beckman Halaman 773] :

$$I_L = I_{sc} \quad \dots\dots\dots 2.24.)$$

Pada kondisi rangkaian terbuka besarnya arus adalah nol dan 1 pada persamaan 2.22 relatif kecil dibandingkan suku eksponensial sehingga [Wiliam A. Beckman Halaman 774] :

$$I_o = I_L \exp(-V_{oc}/a) \quad \text{.....2.25.)}$$

Pasangan I-V yang diukur pada kondisi daya maksimum dapat disubstitusikan ke dalam persamaan 2.22 dengan memasukkan I_o yang didapat dari persamaan 2.25 dan I_L dari persamaan 2.24. Sekali lagi dengan mengabaikan 1 didapatkan hasil untuk R_s sebagai berikut [Wiliam A. Beckman Halaman 774] :

$$R_s = \frac{a \ln \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_L} \right) - V_{mp} + V_{oc}}{I_{mp}} \quad \text{.....2.26.)}$$

Townsend (1998) memperlihatkan bahwa persamaan-persamaan 2.27 s/d 2.32 dibawah ini merupakan pendekatan yang baik untuk kebanyakan modul PV yang mana sangat diperlukan untuk mencari ‘kelima’ parameter di atas [Wiliam A. Beckman Halaman 774] :

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad \text{.....2.27.)}$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} \left[I_{L,ref} + \mu_{I,sc} (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad \text{.....2.28.)}$$

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{\epsilon N_s}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad \text{.....2.29.)}$$

dimana ϵ adalah *material bandgap energy*, yang berharga 1.12 eV untuk silikon dan 1.35 eV untuk Gallium Arsenide. N_s adalah banyaknya sel dalam seri pada suatu modul dikalikan jumlah modul yang diseri. Subscript *ref* berarti diukur pada kondisi referensi.

Koefisien temperatur arus hubungan pendek $\mu_{I,sc}$ didapat dari pengukuran pada irradiansi referensi [Wiliam A. Beckman Halaman 775] :

$$\mu_{I,sc} = \frac{dT_{sc}}{dT} \cong \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad \text{.....2.30.)}$$

dimana T_2 dan T_1 adalah dua temperatur yang pusatnya sekitar temperatur referensi.

Serupa dengan itu koefisien temperatur dari tegangan arus terbuka dari pengukuran pada irradiansi referensi adalah [Wiliam A. Beckman Halaman 775] :

$$\mu_{V,oc} = \frac{dV_{oc}}{dT} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad \text{.....2.31.)}$$

Hubungan lainnya yang penting adalah [Wiliam A. Beckman Halaman 775] :

$$a_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} T_{c,ref} - V_{oc,ref} + \epsilon N_s}{\frac{\mu_{I,sc} T_{c,ref}}{I_{L,ref}} - 3} \quad \text{.....2.32.)}$$

Jika harga a_{ref} pada persamaan 2.32 lebih besar dari nol dan lebih kecil dari harga yang didapat dari persamaan 2.27 (dengan memasukkan R_s bernilai nol) maka pemodelan sel/modul/array telah lengkap.

Dengan melakukan pengukuran pada kondisi referensi untuk mendapatkan V_{oc} , I_{sc} , I_{mp} , V_{mp} , $\mu_{I,sc}$, $\mu_{V,oc}$ dan dengan memakai persamaan 2.24, 2.25, 2.26 dan 2.32 maka akan didapatkan $I_{o,ref}$, $I_{L,ref}$, $R_{s,ref}$ dan a . Selanjutnya persamaan 2.27, 2.28, 2.29, dapat digunakan untuk menghitung I_o , I_L dan a pada sembarang temperatur. R_s diasumsikan tidak tergantung temperatur.

Karakteristik I-V dapat dibuat dengan memakai hubungan persamaan 2.22 dan 2.23 dengan asumsi R_{sh} sama dengan tak terhingga.

Efisiensi pada kondisi daya maksimum dari sebuah modul sel surya diberikan dengan [Wiliam A. Beckman Halaman 777]

$$\eta_{mp} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{A_c G_T} \quad \dots\dots\dots 2.33.)$$

Pengaruh temperatur pada efisiensi dapat dinyatakan dalam koefisien temperatur efisiensi pada kondisi daya maksimum, $\mu_{P,mp}$, sebagai [Wiliam A. Beckman Halaman 777]

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu_{P,mp} (T_c - T_{ref}) \quad \dots\dots\dots 2.34.)$$

dimana koefisien temperatur efisiensi pada kondisi daya maksimum, $\mu_{P,mp}$ dapat didekati dengan [Wiliam A. Beckman Halaman 778]

$$\mu_{P,mp} = \frac{I_{mp}}{A_c G_T} \frac{dV_{oc}}{dT} = \eta_{mp,ref} \frac{\mu_{Voc}}{V_{mp}} \quad \dots\dots\dots 2.35.)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Untuk mengetahui pengaruh penguatan radiasi masukan pada sel surya maka perlu dilakukan suatu pengujian pada kondisi kerja yang sebenarnya. Dari pengujian ini diharapkan nantinya akan didapatkan suatu masukan untuk perbaikan guna peningkatan unjuk kerja sel surya.

Eksperimen yang dilaksanakan akan membandingkan efisiensi, daya masukan dan karakteristik I-V sel surya sebelum dan sesudah mendapatkan tambahan reflektor. Dengan demikian alat penelitian yang akan dirakit terdiri dari tiga rangkaian yaitu,

1. Rangkaian untuk sistem sel surya yang berdiri sendiri
2. Rangkaian untuk sistem sel surya dengan penambahan reflektor 90°
3. Rangkaian untuk sistem sel surya dengan penambahan reflektor 60°

Data yang akan dipakai untuk menghitung efisiensi elektrik adalah data yang didapat pada kondisi *steady state* yakni pada suatu kondisi dimana pengaruh radiasi matahari, temperatur udara, dan kecepatan angin adalah relatif konstan. Penelitian dilaksanakan di Surakarta yang terletak di lintang (ϕ) $-7,6^\circ$ LS dan garis bujur lokal (L_{loc}) $110,8^\circ$ BT. Bujur standar Surakarta (L_{st}) adalah 105° BT.

3.1. Peralatan Penelitian

3.1.1. Sel Surya

Sel surya yang akan digunakan pada eksperimen ini adalah buatan BP Solar dengan kode BP 255. Dimensi sel surya 1004 x 448 mm. Sel surya tersebut pada kondisi radiasi $1000\text{W}/\text{m}^2$, temperatur sel surya 25°C mempunyai spesifikasi sebagai berikut : $P_{max} : 55\text{W}$; $V_{mp} : 17,0\text{V}$; $I_{mp} : 3,23\text{A}$; $I_{sc} : 3,54\text{A}$; $V_{oc} : 21,2\text{V}$

3.1.2. Reflektor

Reflektor yang digunakan dalam penelitian ini berupa reflektor datar dengan bahan aluminium setebal 0,3 mm. Dimensi reflektor 1 x 1,5 m, reflektansi reflektor $\rho_r:0,85$. Reflektor dipasang pada rangka kayu yang juga berfungsi sebagai tempat meletakkan sel surya dengan kemiringan 90° untuk satu pengujian dan 60° untuk pengujian lain.

3.1.3. Alat Ukur

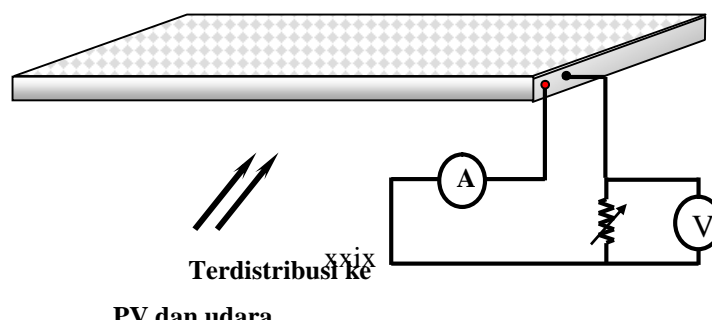
Berikut ini adalah alat ukur dan fungsinya dalam penelitian :

1. Lux meter : digunakan untuk mengukur tingkat radiasi masukan.
2. Sensor suhu (LM-35) : digunakan untuk mengukur temperatur sel surya dan temperatur udara lingkungan
3. Converter : mengubah input analog LM-35 (temperatur) menjadi bentuk digital di komputer
4. Termometer : digunakan untuk kalibrasi sensor suhu
5. Hambatan geser : untuk memberikan variasi hambatan pada arus dan tegangan keluaran sel surya.
6. Ampere meter : digunakan untuk mengukur arus keluaran sel surya tiap perubahan hambatan.
7. Volt meter : mengukur tagangan keluaran sel surya tiap perubahan hambatan.
8. Kompas : untuk menentukan sudut azimuth permukaan sel surya dan reflektor.

3.2. Skema Alat Penelitian

3.2.1. Skema Alat Sel Surya yang Berdiri Sendiri

Rangkaian untuk sistem sel surya yang berdiri sendiri dapat dilihat seperti pada gambar 3.1 berikut ini.

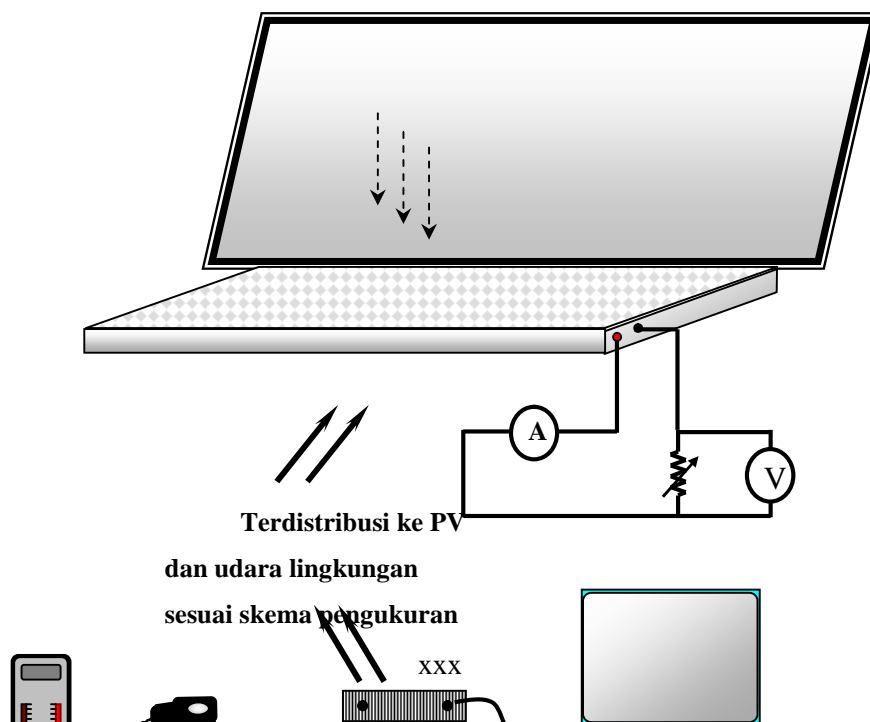


Gambar 3.1. Rangkaian percobaan pada sistem sel surya berdiri sendiri

Komponen utama dari rangkaian pertama ini terdiri dari sel surya yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya dari matahari menjadi energi listrik. Sel surya tersebut dihubungkan secara seri dengan ampere meter dan hambatan geser, yang berfungsi sebagai beban. Selanjutnya voltmeter digital dipasang secara paralel dengan hambatan geser. Untuk mengukur arus (I) digunakan ampere meter digital sedangkan untuk mengukur tegangan (V) digunakan voltmeter digital. Akan dicatat besarnya pasangan arus dan tegangan untuk setiap perubahan beban tahanan listrik pada hambatan geser. Tahanan listrik mempunyai *range* dari 0 ohm sampai dengan harga tertentu yang memberikan arus sebesar 0 ampere. Secara terpisah digunakan luxmeter untuk mengukur tingkat radiasi yang masuk ke sel surya. Untuk mengukur temperatur sel surya dan temperatur lingkungan digunakan sensor suhu dengan kemampuan baca berskala 2 derajat celsius.

3.2.2. Skema Alat Sel Surya Dengan Penambahan Reflektor

Percobaan selanjutnya dilakukan dengan menggunakan sistem seperti terlihat pada gambar 3.2 berikut ini.

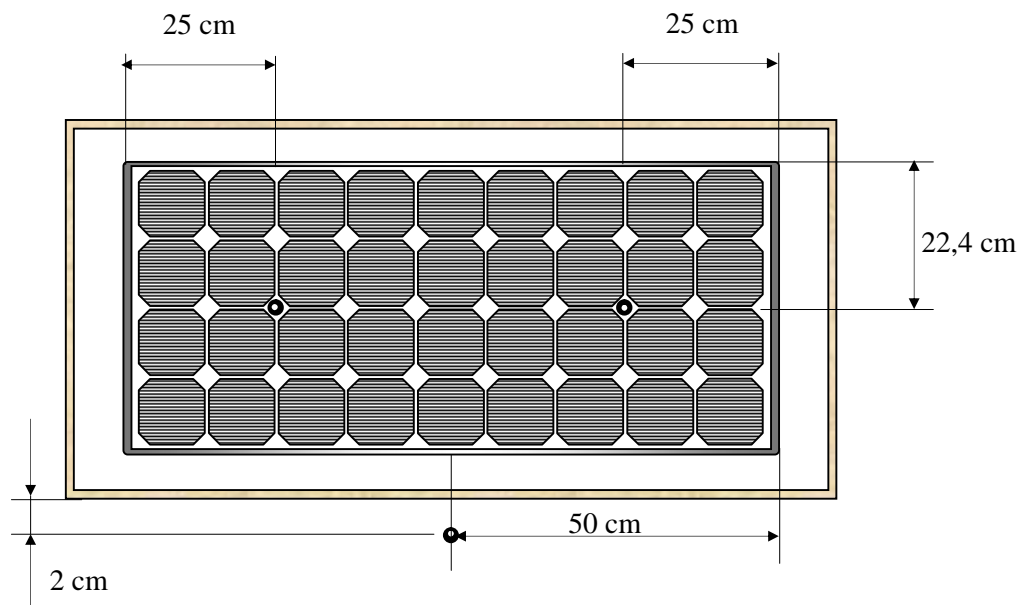


Gambar. 3.2. Rangkaian percobaan sistem PV dengan penambahan reflektor

Komponen utama dari sistem ini adalah sel surya dan reflektor. Rangkaian elektronik untuk sel surya sama seperti percobaan sebelumnya. Seperti percobaan pertama, secara terpisah digunakan luxmeter untuk mengukur tingkat radiasi yang masuk ke sel surya. Untuk mengukur temperatur sel surya dan lingkungan digunakan sensor suhu yang sama seperti pengujian pertama.

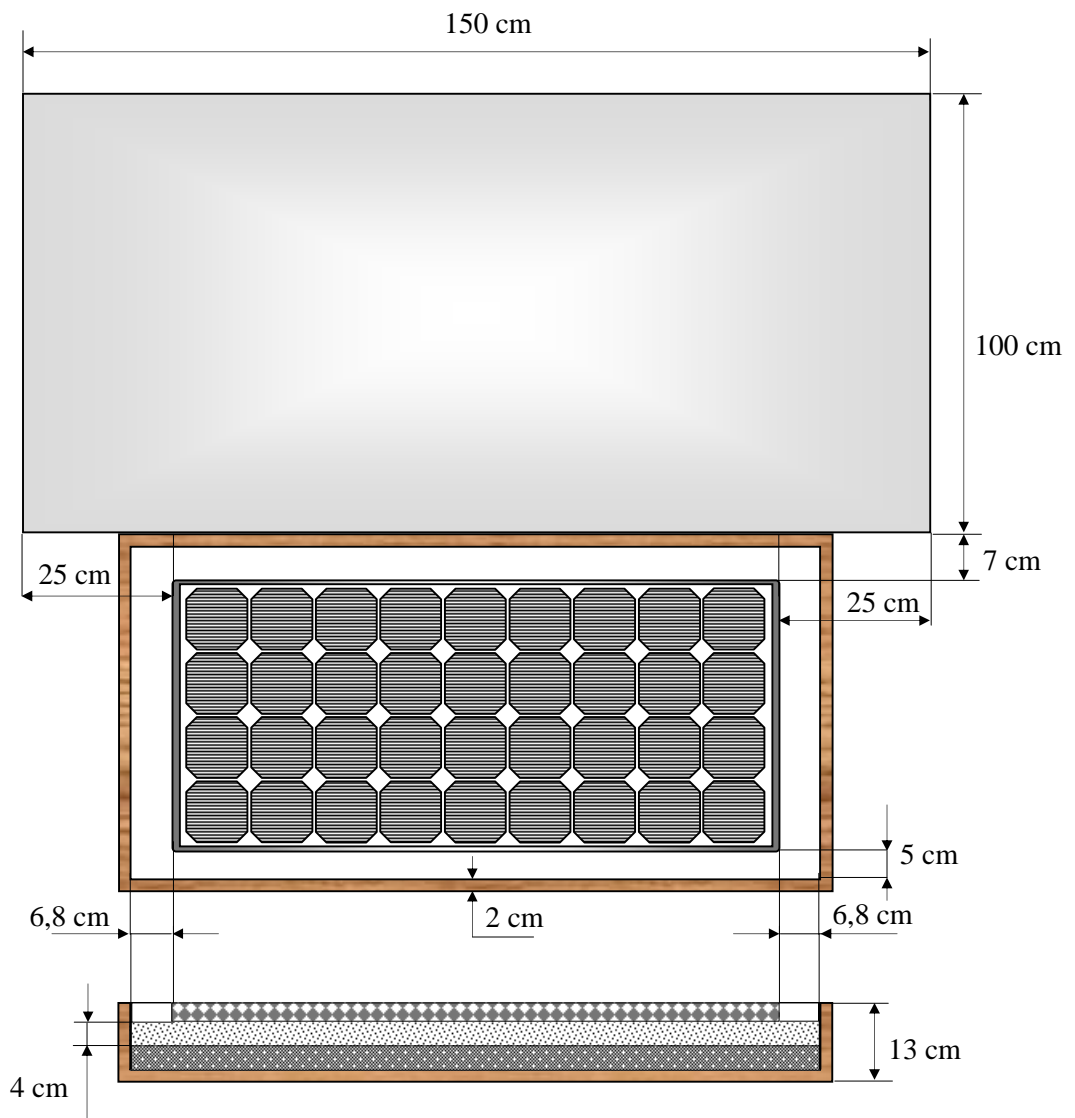
3.2.3. Skema Penempatan Titik Pengukuran Temperatur

Penempatan titik pengukuran temperatur sel surya diambil dua buah titik seperti gambar 3.3 berikut ini dengan pertimbangan agar dapat mewakili temperatur keseluruhan sel surya. Sedang pada pengukuran temperatur lingkungan diambil jarak 2 cm menyamping dari rangka kayu dengan pertimbangan dapat mewakili temperatur udara sekitar sel surya.








Gambar 3.3. Skema penempatan titik pengukuran temperatur

3.2.4. Dimensi Penempatan Sel Surya dan Reflektor Pada Rangka Kayu



Keterangan :

-  : Sel Surya
-  : Styrofoam
-  : Rangkaian Thermal
-  : Rangka Kayu
-  : Reflektor

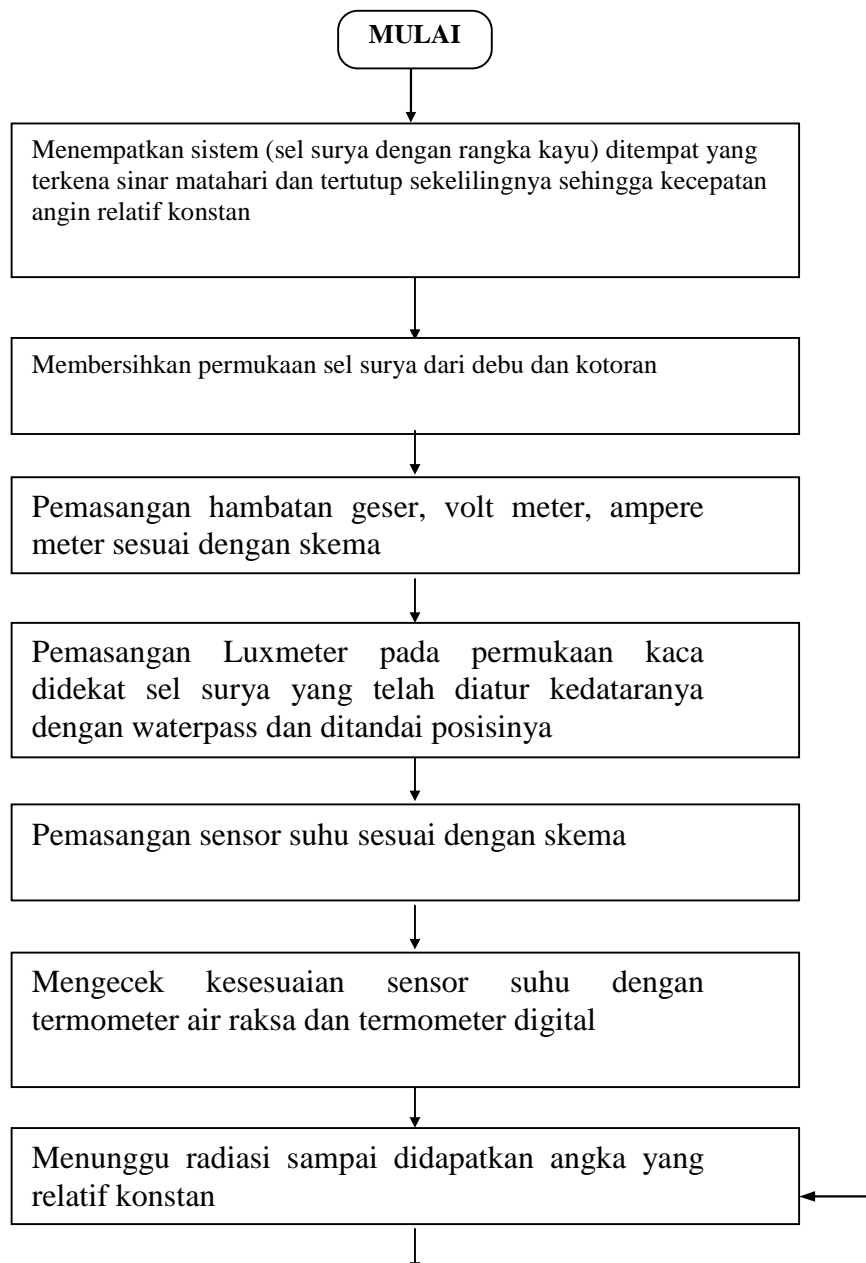
Gambar 3.4. Skema Penempatan Sel Surya dan Reflektor Pada Rangka Kayu

3.3. Jalan Penelitian

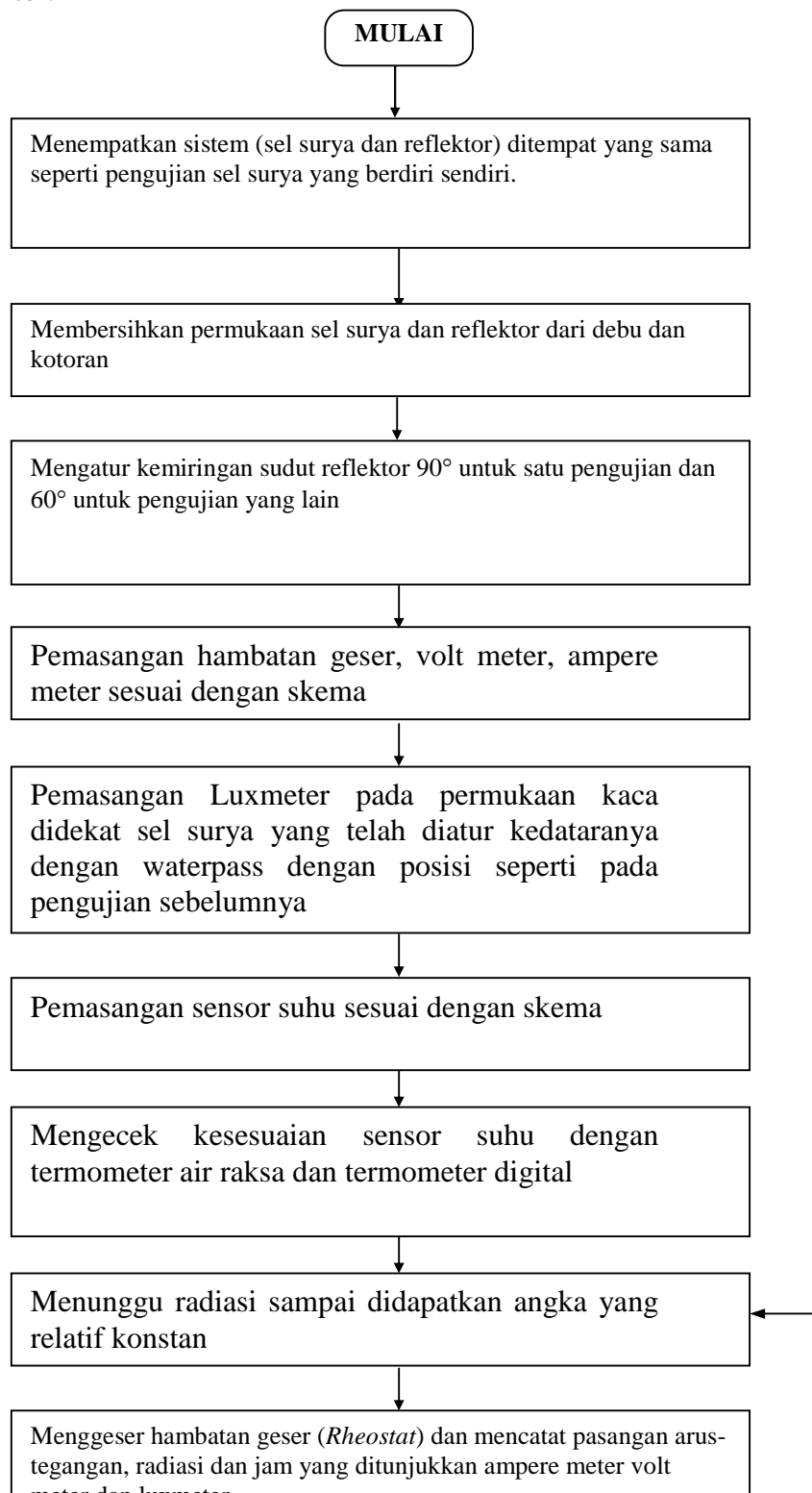
Data yang akan diambil dalam penelitian adalah data-data yang diperlukan agar dapat dilakukan pengukuran dan atau perhitungan perolehan energi surya, perolehan energi listrik.

Berikut ini adalah langkah-langkah dalam pengambilan data setelah sebelumnya dilakukan kalibrasi sensor suhu :

1. Langkah pengambilan data untuk pengujian sel surya yang berdiri sendiri.



2. Langkah pengambilan data untuk pengujian sel surya dengan penambahan reflektor.





Selanjutnya hasil pengolahan data akan disajikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan perbandingan karakteristik sel surya yang berdiri sendiri dengan sel surya yang diberi tambahan reflektor.

3.4. Diagram Alir Perhitungan

3.4.1. Perhitungan Radiasi Masukan Tanpa Reflektor

Karena sel surya dalam posisi horisontal maka radiasi masukan yang diterima sel surya sama dengan radiasi yang di peroleh dari hasil pengukuran. Sehingga dapat ditulis :

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$G_T = G$$

3.4.2. Perhitungan Radiasi Masukan Dengan Reflektor

MULAI

Waktu pengambilan data (Standart Time)
Radiasi pada permukaan datar (G)
Hari ke (n)
Konstanta surya (G_{sc})
Posisi lintang Latitude (ϕ)
Bujur lokal Longitude (L_{loc})
Bujur standart (L_{st})
Slope Sel Surya (β_c)
Slope reflektor (β_r)
Sudut azimuth sel surya (γ)
Sudut azimuth reflektor (γ_r)
Lebar sel surya (W_c)
Lebar reflektor (W_r)
Panjang hinge reflektor (L_r)
Panjang sel surya (L_c)
Sudut altitude utara – selatan (α_{NS})
Faktor bentuk kolektor – reflektor (F_{c-r})
Reflektansi tanah (ρ_g)
Reflektansi reflektor (ρ_r)

Perhitungan Akibat Gerak Semu Harian Matahari

1. Sudut deklinasi

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284, n}{365} \right)$$

2. Persamaan waktu

$$E = 229,2 \{ 0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B \}$$

$$\text{dengan } B = \frac{360(n-1)}{365}$$

3. Waktu surya $ST = \text{Standart Time} + [4(L_{st} - L_{loc}) + E]$

4. Sudut jam : $\omega = 15^\circ (ST - 12.00)$

5. Sudut zenith : $\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$

6. Sudut datang radiasi langsung matahari ke sel surya

$$\cos \theta = (\sin \delta \sin \phi \cos \beta) - (\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos$$

γ)

$$+ (\cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega)$$

1

11. Sudut datang radiasi langsung matahari ke reflektor

$$\cos \theta_r = (\sin \delta \sin \phi \cos \beta_r) - (\sin \delta \cos \phi \sin \beta_r$$

$\cos \gamma_r$)

$$+ (\cos \delta \cos \phi \cos \beta_r \cos \omega)$$

Dimensi Arah Dan Luasan Penyinaran

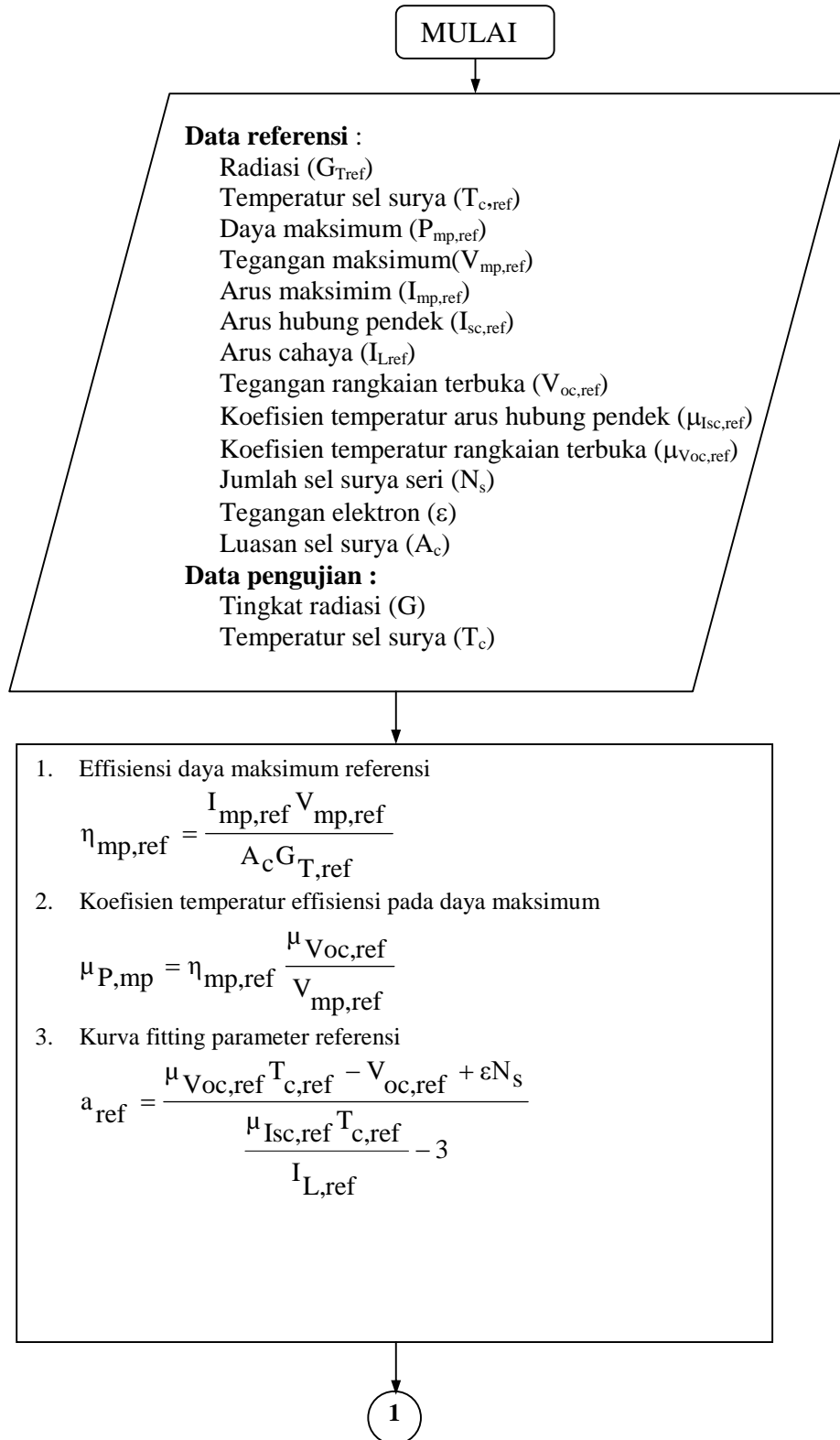
1. Rasio lebar sel surya

$$X_c = \{W_r \sin(\alpha_{NS} - \beta_r)\} / \{\sin(2\beta_r + \beta_c - \alpha_{NS})\}$$

2. Dimensi sinar pada sel surya reflektor

$$v = \tan(W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_r) \cdot I$$

3.4.3. Perhitungan Arus dan Tegangan Teoritis



1

4. Series Resistant

$$R_s = \frac{a_{\text{ref}} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{\text{mp,ref}}}{I_{\text{L,ref}}} \right) - V_{\text{mp,ref}} + V_{\text{oc,ref}}}{I_{\text{mp,ref}}}$$

5. Dioda reverse saturation current referensi

$$I_{\text{o,ref}} = I_{\text{L,ref}} \exp(-V_{\text{oc,ref}} / a_{\text{ref}})$$

6. Kurva fitting parameter

$$a = a_{\text{ref}} \frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}}$$

7. Light current

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,\text{ref}}} \left[I_{\text{L,ref}} + \mu_{\text{Isc,ref}} (T_c - T_{c,\text{ref}}) \right]$$

8. Dioda reverse saturation current

$$I_o = I_{\text{o,ref}} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^3 \exp \left[\frac{\varepsilon N_s}{a_{\text{ref}}} \left(1 - \frac{T_{c,\text{ref}}}{T_c} \right) \right]$$

9. Tegangan keluaran fungsi arus

$$V(I) = \left[-I R_s + \ln \left(\frac{-(I - I_L - I_o)}{I_o} \cdot a \right) \right]$$

SELESAI

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dengan beberapa masukan data yang didapat dari data referensi dan percobaan, akan dilakukan perhitungan untuk radiasi akibat penambahan reflektor efisiensi, dari sel surya yang berdiri sendiri maupun sistem sel surya yang mendapat tambahan reflektor.

4.1. Data Penelitian

4.1.1. Data Referensi

Data referensi yang digunakan dalam perhitungan diambil terutama yang berhubungan dengan data sel surya dan reflektor yang digunakan dalam penelitian serta letak geografis kota Solo tempat dilakukannya penelitian. Data referensi tersebut dapat dilihat dilampiran 1.

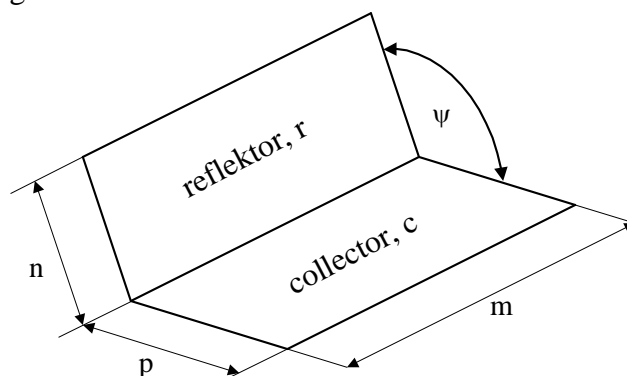
4.1.2. Data Percobaan

Data percobaan yang dipergunakan dalam perhitungan diambil saat percobaan dilakukan, diantaranya pasangan arus dan tegangan, jam saat pengambilan data, temperatur sel surya, temperatur lingkungan. Untuk lebih jelasnya data hasil percobaan dapat dilihat pada lampiran 2.

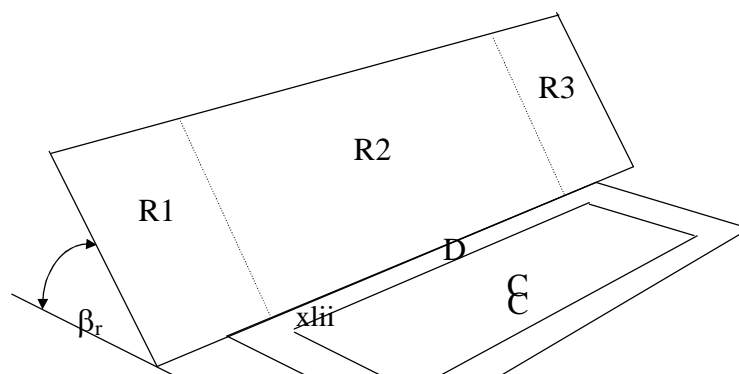
4.2. Analisa Data

4.2.1. Perhitungan Faktor Bentuk Sel surya–Reflektor

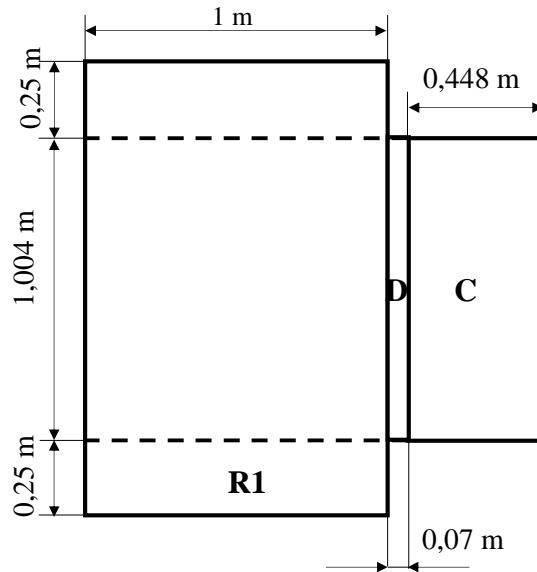
Perhitungan faktor bentuk mengacu pada gambar 4.1 dibawah ini dan lampiran 3 grafik faktor bentuk sel surya-reflektor. Dimensi, *subscript* dan simbol mengacu pada gambar 4.2 dan 4.3



Gambar 4.1. Geometri sistem PV–Reflektor yang diteliti



Gambar 4.2 Sketsa Sistem PV dengan reflektor yang diteliti.



Gambar 4.3 Dimensi reflektor dan sel surya

Berdasarkan gambar 4.3 maka dapat dituliskan faktor bentuk sel surya–reflektor (F_{c-r}) sebagai berikut,

$$F_{c-r} = F_{C-R1,R2,R3} = F_{C-R1} + F_{C-R2} + F_{C-R3} \quad \dots\dots\dots 4.1)$$

dimana $F_{C-R1} = F_{C-R3}$

Besarnya F_{C-R2} dihitung dengan menggunakan hubungan berikut,

$$F_{R2-C,D} = F_{R2-C} + F_{R2-D} \quad \dots\dots\dots 4.2)$$

$$F_{R2-C} = F_{R2-C,D} - F_{R2-D}$$

.....4.3)

Dari hubungan resiprositas didapatkan bahwa pada luasan R2, C, D berlaku,

$$F_{R2-C,D} = \frac{A_{C,D}}{A_{R2}} \times F_{C,D-R2} \quad \text{.....4.4)}$$

$$F_{R2-D} = \frac{A_D}{A_{R2}} \times F_{D-R2} \quad \text{.....4.5)}$$

$$F_{C-R2} = \frac{A_{R2}}{A_C} \times F_{R2-C} \quad \text{.....4.6)}$$

Dari gambar 4.1 dan lampiran.3. (grafik faktor bentuk sel surya-reflektor) didapatkan hasil untuk $F_{C,D-R2}$, F_{D-R2} sebagai berikut :

Tabel 4.1. Faktor bentuk F_{C-DR2} dan F_{D-R2}

No	Faktor Bentuk	n (meter)	P (meter)	m (meter)	n/m	p/m	Hasil	
							$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	$F_{C,D-R2}$	1	0,518	1,004	0,996	0,518	0,31	0,13
2	F_{D-R2}	1	0,07	1,004	0,996	0,07	0,44	0,21

Dengan memakai persamaan 4.4, 4.5, dan 4.6 dapat dihitung besarnya $F_{R2-C,D}$; F_{R2-C} dan F_{R2-D} , sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 4.2. Faktor bentuk F_{R2-C} , F_{R2-D} , F_{R2-C}

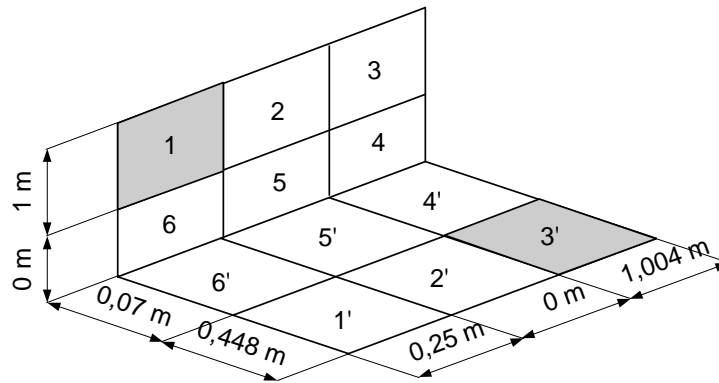
No	Faktor Bentuk	Hasil	
		$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	$F_{R2-C,D}$	0,1612	0,0676
2	F_{R2-D}	0,0309	0,0148
3	F_{R2-C}	0,1303	0,0528

Dengan memakai persamaan 4.6 maka besarnya F_{C-R2} dapat ditentukan sebagai berikut :

Tabel 4.3. Faktor bentuk F_{C-R2}

No	Faktor Bentuk	Hasil	
		$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	F_{C-R2}	0,2897	0,1174

Untuk menghitung F_{C-R1} digunakan persamaan berikut ini yang mengacu pada gambar 4.4. Dengan $C = 3'$ dan $R1 = 1$



Gambar 4.4 Susunan umum faktor bentuk F_{C-R1}

$$A_{3'} F_{3'-1} = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} &K_{(1,2,3,4,5,6)^2} - K_{(2,3,4,5)^2} - K_{(1,2,5,6)^2} + K_{(4,5,6)^2} - K_{(4,5,6)-(1',2',3',4',5',6')} \\ &- K_{(1,2,3,4,5,6)-(4',5',6')} + K_{(1,2,5,6)-(5',6')} + K_{(2,3,4,5)-(4',5')} + K_{(5,6)-(1',2',5',6')} \\ &+ K_{(4,5)-(2',3',4',5')} + K_{(2,5)^2} - K_{(2,5)-5'} - K_{(5,6)^2} - K_{(4,5)^2} - K_{5-(2',5')} + K_{5^2} \end{aligned} \right] \quad \dots\dots 4.7)$$

dimana suku-suku K didefinisikan sebagai :

$$K_{m-n} = A_m F_{m-n} \quad \dots\dots\dots 4.8)$$

$$K_{(m)^2} = A_m F_{m-m'} \quad \dots\dots\dots 4.9)$$

Hasil perhitungan selanjutnya disajikan pada tabel berikut ini :

Tabel 4.4. Hasil perhitungan komponen F_{C-R1}

No	Faktor bentuk	n (meter)	p (meter)	m (meter)	n/m	p/m	Hasil	
							$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	$F_{(123456)' - 123456}$	1	0,518	1,25	0,800	0,414	0,310	0,140
2	$F_{(2345)' - 2345}$	1	0,518	1,004	0,996	0,516	0,280	0,130
3	$F_{(1256)' - 1256}$	1	0,518	0,25	4,000	2,072	0,160	0,000
4	$F_{(456)' - 456}$	0	0,07	1,25	0,000	0,056	0,000	0,000
5	$F_{1'2'3'4'5'6' - 456}$	0	0,518	1,25	0,000	0,414	0,000	0,000
6	$F_{4'5'6' - 123456}$	1	0,07	1,25	0,800	0,056	0,430	0,215
7	$F_{5'6' - 1256}$	1	0,07	0,25	4,000	0,280	0,380	0,175
8	$F_{4'5' - 2345}$	1	0,07	1,004	0,996	0,070	0,430	0,210
9	$F_{1'2'5'6' - 56}$	0	0,518	0,25	0,000	2,072	0,000	0,000
10	$F_{2'3'4'5' - 45}$	0	0,518	1,004	0,000	0,516	0,000	0,000
11	$F_{5'-25}$	1	0,07	0	-	-	0,000	-
12	$F_{(25)' - 25}$	1	0,518	0	-	-	0,000	-
13	$F_{(56)' - 56}$	0	0,07	0,25	0,000	0,280	0,000	-
14	$F_{(45)' - 45}$	0	0,07	1,004	0,000	0,070	0,000	-

15	F _{2'5' - 5}	0	0,518	0	-	-	0,000	-
16	F _{5' - 5}	0	0,07	0	-	-	0,000	-

Tabel 4.5. Hasil Perhitungan komponen F_{C-R1}

No	Faktor bentuk	Area	(Area)'	Hasil		K	
		(nxm)	(pxm)	$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$	$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	F _{123456 - (123456)'}	1,250	0,648	0,161	0,073	0,201	0,091
2	F _{2345 - (2345)'}	1,004	0,520	0,145	0,067	0,146	0,068
3	F _{(1256)' - 1256}	0,250	0,130	0,083	0,000	0,021	0,000
4	F _{456 - (456)'}	0,000	0,088	-	-	-	-
5	F _{456 - 1'2'3'4'5'6'}	0,000	0,648	-	-	-	-
6	F _{123456 - 4'5'6'}	1,250	0,088	0,030	0,015	0,038	0,019
7	F _{1256 - 5'6'}	0,250	0,018	0,027	0,012	0,007	0,003
8	F _{2345 - 4'5'}	1,004	0,070	0,030	0,015	0,030	0,015
9	F _{56 - 1'2'5'6'}	0,000	0,130	-	-	-	-
10	F _{45 - 2'3'4'5'}	0,000	0,520	-	-	-	-
11	F _{25 - 5'}	0,000	0,000	-	-	-	-
12	F _{25 - (25)'}	0,000	0,000	-	-	-	-
13	F _{56 - (56)'}	0,000	0,018	-	-	-	-
14	F _{45 - (45)'}	0,000	0,070	-	-	-	-
15	F _{5 - 2'5'}	0,000	0,000	-	-	-	-
16	F _{5 - 5'}	0,000	0,000	-	-	-	-

Dengan memakai persamaan 4.7, 4.8 dan 4.9 maka besarnya F_{C-R1} dan F_{C-R3} dapat ditentukan sebagai berikut :

Tabel 4.6. Hasil perhitungan faktor bentuk (F_{C-R}) total

No	Faktor Bentuk	Hasil	
		$\psi = 90^\circ$	$\psi = 120^\circ$
1	F _{C-R1}	0,0375	0,0246
2	F _{C-R2}	0,2897	0,1174
3	F _{C-R3}	0,0375	0,0246
	F _{C-R}	0,3648	0,1725

4.2.2 Perhitungan Radiasi Masukan Karena Penambahan Reflektor

Berikut ini adalah perhitungan pada sistem sel surya dengan penambahan reflektor untuk kemiringan reflektor 90° , diambil data B4 pada lampiran.2.

4.2.2.1. Perhitungan Akibat Gerak Semu Harian Matahari

1. Menentukan Sudut Deklinasi

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284, n}{365}\right)$$

Pada Tanggal 11 Juni 2003; $n = 162$

$$\begin{aligned}\delta &= 23,45 \sin\left(360 \frac{284 \times 162}{365}\right) \\ &= 23,086^\circ\end{aligned}$$

2. Menentukan Persamaan Waktu

$$E = 229,2\{0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B\}$$

$$\text{dengan } B = \frac{360(n-1)}{365} ;$$

$$B = 158,795^\circ$$

maka :

$$\begin{aligned}E &= 229,2\{0,000075 + 0,001868 \cos(159,781^\circ) - 0,032077 \sin(159,781^\circ) \\ &\quad - 0,014615 \cos(2 \times 159,781^\circ) - 0,04089 \sin(2 \times 159,781^\circ)\} \\ &= 0,806 \text{ menit}\end{aligned}$$

3. Menentukan Waktu Surya

$$\text{Solar Time} = \text{Standart Time} + [4(L_{st} - L_{loc}) + E]$$

Standart time diambil jam tengah antara jam awal pengambilan data dan jam akhir pengambilan data :

$$\text{Standart Time} = 10:09:01 \text{ AM}$$

$$\begin{aligned}\text{Solar Time} &= \text{Standart Time} + [4(255 - 249,2) + 0,806] \\ &= 10:33:01 \text{ AM}\end{aligned}$$

4. Menentukan Sudut Jam

$$\omega = 15^\circ (\text{ST} - 12:00:00)$$

$$= 15^\circ (10:33:01 - 12:00:00)$$

$$= -21,746^\circ$$

5. Menentukan Sudut Zenith

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$$

$$= \cos 23,086^\circ \cos (-7,6^\circ) \cos (-21,746^\circ) + \sin 23,086^\circ \sin (-7,6^\circ)$$

$$\theta_z = 37,336^\circ$$

6. Menentukan Sudut Datang Radiasi Langsung (*Beam*) Matahari Ke Sel Surya

$$\cos \theta = (\sin \delta \sin \phi \cos \beta_c)$$

$$- (\sin \delta \cos \phi \sin \beta_c \cos \gamma)$$

$$+ (\cos \delta \cos \phi \cos \beta_c \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \phi \sin \beta_c \cos \gamma \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \beta_c \sin \gamma \sin \omega)$$

$$\cos \theta = \{ \sin 23,086^\circ \sin (-7,6^\circ) \cos 0^\circ \}$$

$$- \{ \sin 23,086^\circ \cos (-7,6^\circ) \sin 0^\circ \cos (-15^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \cos (-7,6^\circ) \cos 0^\circ \cos (-21,746^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \sin (-7,6^\circ) \sin 0^\circ \cos (-15^\circ) \cos (-21,746^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \sin 0^\circ \sin (-15^\circ) \sin (-21,746^\circ) \}$$

$$\theta = 37,336^\circ$$

7. Menentukan Sudut Datang Radiasi Langsung Matahari Ke Reflektor

$$\cos \theta_r = (\sin \delta \sin \phi \cos \beta_r)$$

$$- (\sin \delta \cos \phi \sin \beta_r \cos \gamma)$$

$$+ (\cos \delta \cos \phi \cos \beta_r \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \phi \sin \beta_r \cos \gamma \cos \omega)$$

$$+ (\cos \delta \sin \beta_r \sin \gamma \sin -\omega)$$

$$\cos \theta_r = \{ \sin 23,086^\circ \sin (-7,6^\circ) \cos 90^\circ \}$$

$$- \{ \sin 23,086^\circ \cos (-7,6^\circ) \sin 90^\circ \cos (-15^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \cos (-7,6^\circ) \cos 90^\circ \cos (-21,746^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \sin (-7,6^\circ) \sin 90^\circ \cos (-15^\circ) \cos (-21,746^\circ) \}$$

$$+ \{ \cos 23,086^\circ \sin 90^\circ \sin (-15^\circ) \sin (-21,746^\circ) \}$$

$$\theta_r = 66,649^\circ$$

8. Menentukan Faktor Geometri Sel surya

$$\begin{aligned}R_b &= \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \\&= \frac{\cos 37,336^\circ}{\cos 37,336^\circ} \\&= 1\end{aligned}$$

9. Menentukan Faktor Geometri Reflektor

$$\begin{aligned}R_{br} &= \frac{\cos\theta_r}{\cos\theta_z} \\&= \frac{\cos 66,649^\circ}{\cos 37,336^\circ} \\&= 0,499\end{aligned}$$

10. Menentukan Sudut Altitude Matahari

$$\begin{aligned}\alpha_s &= 90^\circ - \theta_z \\&= 90^\circ - 37,336^\circ \\&= 52,664^\circ\end{aligned}$$

11. Menentukan Sudut Azimuth Matahari

$$\gamma_s = C_1 C_2 \gamma_s' + C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) 180^\circ$$

$$\text{Dengan } \sin \gamma_s' = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad ; \quad \gamma_s' = -34,191^\circ$$

$$C_1 = 1 \text{ untuk } |\text{tg } \delta / \text{tg } \phi| > 1$$

$$C_2 = 1 \text{ untuk } \phi (\phi - \delta) \geq 0$$

$$C_3 = -1 \text{ untuk } \omega \leq 0$$

$$\text{Maka } \gamma_s = -34,191^\circ$$

12. Menentukan Proyeksi Sudut Altitude ke Bidang Utara Selatan

$$\begin{aligned}\alpha_{NS} &= 180^\circ - \text{Arctan} \left(\frac{\sin \alpha_s}{\cos \alpha_s \cdot \cos \gamma_s} \right) \\&= 180^\circ - \text{Arctan} \left(\frac{\sin 54,1^\circ}{\cos 54,1^\circ \cdot \cos 30,801^\circ} \right) \\&= 122,251^\circ\end{aligned}$$

Hasil perhitungan akibat pengaruh gerak semu harian matahari untuk selanjutnya disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 4.7. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya berdiri sendiri

Data	<i>Standart Time</i>	<i>Solar Time</i>	ω ($^{\circ}$)	θ ($^{\circ}$)	θ_z ($^{\circ}$)	R_b
A1	7:57:52 AM	8:22:04 AM	-54,481	61,423	61,423	1
A2	8:03:43 AM	8:27:55 AM	-53,021	60,192	60,192	1
A3	8:09:03 AM	8:33:15 AM	-51,688	59,076	59,076	1
A4	8:12:23 AM	8:36:35 AM	-50,854	58,382	58,382	1
A5	8:25:05 AM	8:49:17 AM	-47,679	55,767	55,767	1
A6	8:36:36 AM	9:00:48 AM	-44,800	53,440	53,440	1
A7	8:40:06 AM	9:04:18 AM	-43,925	52,742	52,742	1
A8	8:50:32 AM	9:14:45 AM	-41,315	50,687	50,687	1
B1	9:07:34 AM	9:31:46 AM	-37,058	47,440	47,440	1
B2	9:11:54 AM	9:36:07 AM	-35,973	46,634	46,634	1
B3	9:18:57 AM	9:43:10 AM	-34,210	45,349	45,349	1
B4	9:42:29 AM	10:06:41 AM	-28,329	41,291	41,291	1
B5	9:49:49 AM	10:14:01 AM	-26,496	40,110	40,110	1
B6	9:58:33 AM	10:22:45 AM	-24,313	38,764	38,764	1
B7	10:07:56 AM	10:32:08 AM	-21,965	37,400	37,400	1
B8	10:55:29 AM	11:19:41 AM	-10,079	32,161	32,161	1
C1	11:00:29 AM	11:24:41 AM	-8,829	31,807	31,807	1
C2	11:23:49 AM	11:48:01 AM	-2,996	30,752	30,752	1

Tabel 4.8. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya dengan reflektor 90°

Data	<i>Standar Time</i>	<i>Solar Time</i>	ω ($^{\circ}$)	θ ($^{\circ}$)	θ_r ($^{\circ}$)	R_{br}	γ_s ($^{\circ}$)	α_{NS} ($^{\circ}$)
A1	8:13:55 AM	8:37:55 AM	-50,521	58,137	74,552	0,505	-56,722	131,438
A2	8:18:41 AM	8:42:41 AM	-49,329	57,153	74,251	0,500	-56,151	130,786
A3	8:24:38 AM	8:48:38 AM	-47,840	55,932	73,870	0,496	-55,405	130,017
A4	8:30:39 AM	8:54:39 AM	-46,337	54,712	73,482	0,492	-54,616	129,290

A5	8:46:13 AM	9:10:13 AM	-42,446	51,611	72,455	0,485	-52,381	127,612
A6	8:52:53 AM	9:16:53 AM	-40,779	50,311	72,007	0,484	-51,333	126,975
A7	8:57:53 AM	9:21:53 AM	-39,529	49,350	71,668	0,483	-50,508	126,526
A8	9:03:03 AM	9:27:03 AM	-38,235	48,366	71,314	0,482	-49,618	126,087
B1	9:31:18 AM	9:55:18 AM	-31,173	43,255	69,346	0,484	-44,019	124,081
B2	9:56:20 AM	10:20:20 AM	-24,917	39,185	67,561	0,492	-37,835	122,773
B3	10:02:00 AM	10:26:00 AM	-23,498	38,338	67,153	0,495	-36,249	122,528
B4	10:09:01 AM	10:33:01 AM	-21,746	37,336	66,649	0,499	-34,191	122,251
B5	10:17:01 AM	10:41:01 AM	-19,746	36,258	66,072	0,503	-31,702	121,965
B6	10:43:07 AM	11:07:07 AM	-13,219	33,299	64,190	0,521	-22,530	121,246
B7	10:58:48 AM	11:22:48 AM	-9,300	32,006	63,069	0,534	-16,289	120,961
B8	11:29:20 AM	11:53:20 AM	-1,667	30,729	60,924	0,565	-3,001	120,695

Tabel 4.9. Hasil perhitungan pengaruh gerak semu harian matahari untuk sel surya dengan reflektor 60°

Data	Standar Time	Solar Time	ω (°)	θ (°)	θ_r (°)	R_{br}	γ_s (°)	α_{NS} (°)
A1	7:56:17 AM	8:20:05 AM	-54,979	61,900	63,184	0,958	-58,605	134,293
A2	8:02:07 AM	8:25:55 AM	-53,521	60,670	62,244	0,951	-57,996	133,327
A3	8:14:16 AM	8:38:05 AM	-50,481	58,134	60,281	0,939	-56,632	131,503
A4	8:18:27 AM	8:42:15 AM	-49,438	57,272	59,607	0,936	-56,132	130,930
A5	8:22:47 AM	8:46:35 AM	-48,354	56,384	58,907	0,933	-55,595	130,362
A6	8:33:23 AM	8:57:11 AM	-45,704	54,234	57,194	0,927	-54,198	129,081
A7	8:37:23 AM	9:01:11 AM	-44,704	53,433	56,549	0,925	-53,639	128,634
A8	9:01:20 AM	9:25:08 AM	-38,715	48,767	52,695	0,919	-49,878	126,325
B1	9:08:51 AM	9:32:39 AM	-36,838	47,358	51,495	0,919	-48,538	125,716
B2	9:12:31 AM	9:36:19 AM	-35,921	46,681	50,911	0,919	-47,852	125,437
B3	10:14:27 AM	10:38:15 AM	-20,438	36,678	41,376	0,936	-32,514	122,130
B4	10:28:35 AM	10:52:23 AM	-16,904	34,915	39,337	0,943	-27,846	121,682
B5	10:37:46 AM	11:01:34 AM	-14,610	33,911	38,054	0,949	-24,564	121,442
B6	10:41:56 AM	11:05:44 AM	-13,567	33,494	37,483	0,952	-23,007	121,345
B7	10:49:32 AM	11:13:20 AM	-11,667	32,802	36,463	0,957	-20,073	121,189

4.2.2.2. Komponen Radiasi Masukan Sistem

1. Menentukan Radiasi Ekstraterrestrial Pada Bidang Horisontal

$$\begin{aligned}
 G_O &= G_{sc} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{365^\circ} \right) \right) \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \\
 &= G_{sc} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{365^\circ} \right) \right) \cdot \left(\cos (-7,6^\circ) \cdot \cos 23,086^\circ \cos (-21.746^\circ) \right. \\
 &\quad \left. + \sin (-7,6^\circ) \cdot \sin 23,086^\circ \right) \\
 &= 1053,229 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

2. Menentukan Indeks Kecerahan Langit

$$\begin{aligned}
 k_T &= \frac{G}{G_o} \\
 &= \frac{672,480}{1053,229} \\
 &= 0,638
 \end{aligned}$$

3. Menentukan Radiasi hambur (*diffuse*)

Untuk : $0,22 \leq k_T \leq 0,80$

Maka $G_d = G (0,9511 - 0,1604 k_T + 4,388 k_T^2 - 16,638 k_T^3 + 12,336 k_T^4)$

$$G_d = 240,044 \text{ W/m}^2$$

4. Menentukan Radiasi Langsung (*Beam*)

$$\begin{aligned}
 G_b &= G - G_d \\
 &= (672,480 - 240,044) \text{ W/m}^2 \\
 &= 432,436 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

5. Menentukan Radiasi Masukan

$$\begin{aligned}
 G_T &= G_b \cdot R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho_g \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \\
 &= 432,436 \times 1 + 240,044 \left(\frac{1 + \cos 0^\circ}{2} \right) \\
 &\quad + (432,436 + 240,044) 0,6 \left(\frac{1 + \cos 0^\circ}{2} \right) \\
 &= 672,48 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan komponen radiasi masukan sistem untuk selanjutnya disajikan dalam tabel berikut ini :

Tabel 4.10. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan untuk sel surya berdiri sendiri

Data	Standart Time	kT	G _o (W/m ²)	G _b (W/m ²)	G _d (W/m ²)	G _T (W/m ²)
A1	7:57:52 AM	0,690	633,744	323,754	113,637	437,391
A2	8:03:43 AM	0,688	658,621	334,237	119,131	453,368
A3	8:09:03 AM	0,683	680,894	339,081	126,219	465,300
A4	8:12:23 AM	0,689	694,609	353,130	125,344	478,474
A5	8:25:05 AM	0,667	745,360	347,066	149,791	496,857
A6	8:36:36 AM	0,659	789,227	355,582	164,418	520,000
A7	8:40:06 AM	0,659	802,134	361,156	167,225	528,381
A8	8:50:32 AM	0,666	839,423	389,598	169,311	558,909

B1	9:07:34 AM	0,646	896,147	381,402	197,646	579,048
B2	9:11:54 AM	0,657	909,773	405,706	191,580	597,286
B3	9:18:57 AM	0,645	931,149	394,102	206,443	600,545
B4	9:42:29 AM	0,652	995,527	434,786	214,127	648,913
B5	9:49:49 AM	0,661	1013,334	460,868	208,996	669,864
B6	9:58:33 AM	0,649	1033,093	445,591	224,954	670,545
B7	10:07:56 AM	0,659	1052,557	474,606	219,090	693,696
B8	10:55:29 AM	0,600	1121,642	376,596	296,056	672,652
C1	11:00:29 AM	0,613	1125,974	407,354	283,298	690,652
C2	11:23:49 AM	0,598	1138,646	377,931	302,591	680,522

Tabel 4.11. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan untuk sel surya dengan reflektor 90°

Data	Standart Time	kT	G _o (W/m ²)	G _b (W/m ²)	G _d (W/m ²)	G _T (W/m ²)
A1	8:13:55 AM	0,572	699,272	199,467	200,628	400,095
A2	8:18:41 AM	0,579	718,495	213,318	202,444	415,762
A3	8:24:38 AM	0,596	742,045	244,126	198,207	442,333
A4	8:30:39 AM	0,589	765,236	241,073	209,336	450,409
A5	8:46:13 AM	0,595	822,619	268,249	220,838	489,087
A6	8:52:53 AM	0,597	845,951	279,105	225,591	504,696
A7	8:57:53 AM	0,620	862,944	324,037	211,418	535,455
A8	9:03:03 AM	0,619	880,064	327,643	216,976	544,619
B1	9:31:18 AM	0,634	964,779	388,365	223,679	612,044
B2	9:56:20 AM	0,649	1026,758	441,839	224,074	665,913
B3	10:02:00 AM	0,647	1039,022	443,027	228,756	671,783
B4	10:09:01 AM	0,638	1053,229	432,436	240,044	672,480
B5	10:17:01 AM	0,656	1068,163	475,477	225,356	700,833
B6	10:43:07 AM	0,665	1107,182	511,777	224,338	736,115
B7	10:58:48 AM	0,663	1123,309	515,068	229,636	744,704
B8	11:29:20 AM	0,651	1138,675	495,164	245,966	741,130

Tabel 4.12. Hasil perhitungan komponen radiasi masukan untuk sel surya dengan reflektor 60°

Data	Standar Time	kT	G _o (W/m ²)	G _b (W/m ²)	G _d (W/m ²)	G _T (W/m ²)
A1	7:56:17 AM	0,705	623,815	335,507	104,102	439,609
A2	8:02:07 AM	0,699	648,748	342,421	111,211	453,632
A3	8:14:16 AM	0,730	699,202	406,684	103,697	510,381
A4	8:18:27 AM	0,710	716,036	392,403	116,247	508,650
A5	8:22:47 AM	0,713	733,233	405,700	117,348	523,048

A6	8:33:23 AM	0,731	774,078	451,144	114,447	565,591
A7	8:37:23 AM	0,719	789,027	444,615	122,840	567,455
A8	9:01:20 AM	0,707	872,944	472,805	144,195	617,000
B1	9:08:51 AM	0,743	897,166	540,043	126,338	666,381
B2	9:12:31 AM	0,755	908,620	563,194	122,854	686,048
B3	10:14:27 AM	0,727	1062,186	612,498	159,632	772,130
B4	10:28:35 AM	0,688	1086,011	550,215	196,868	747,083
B5	10:37:46 AM	0,682	1099,133	545,076	204,837	749,913
B6	10:41:56 AM	0,692	1104,485	567,509	196,491	764,000
B7	10:49:32 AM	0,683	1113,228	554,554	206,279	760,833

4.2.2.3. Perhitungan Pada Sistem Reflektor–Sel surya

1. Menentukan Dimensi Pantulan Reflektor

- $$X_c = \{W_r \sin (\alpha_{NS} - \beta_r)\} / \{\sin (2 \beta_r + \beta_c - \alpha_{NS})\}$$

$$= \{1 \cdot \sin (122,251^\circ - 90^\circ)\} / \{\sin ((2 \times 90^\circ) + 0^\circ - 122,251^\circ)\}$$

$$= 0,631 \text{ m}$$
- $$v = \tan \gamma (W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c) - L_r$$

$$= \tan -15^\circ (1 \cos 90^\circ + 0,631 \cos 0^\circ) - 0,248$$

$$= -0,417 \text{ m}$$
- $$u = \frac{\{X_c \cos \beta_c (W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c - L_r / \tan \gamma)\}}{\{W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c\}}$$

$$= \frac{\{0,631 \cdot \cos 0^\circ (1 \cdot \cos 90^\circ + 0,631 \cos 0^\circ - 0,248 / \text{tg} (-15^\circ))\}}{\{1 \cos 90^\circ + 0,631 \cos 0^\circ\}}$$

$$= 1,557 \text{ m}$$
- $$\Delta y = W_r \sin (\beta_r) - W_c \sin (\beta_c)$$

$$= 1 \sin (90^\circ) - 0,448 \sin (0^\circ)$$

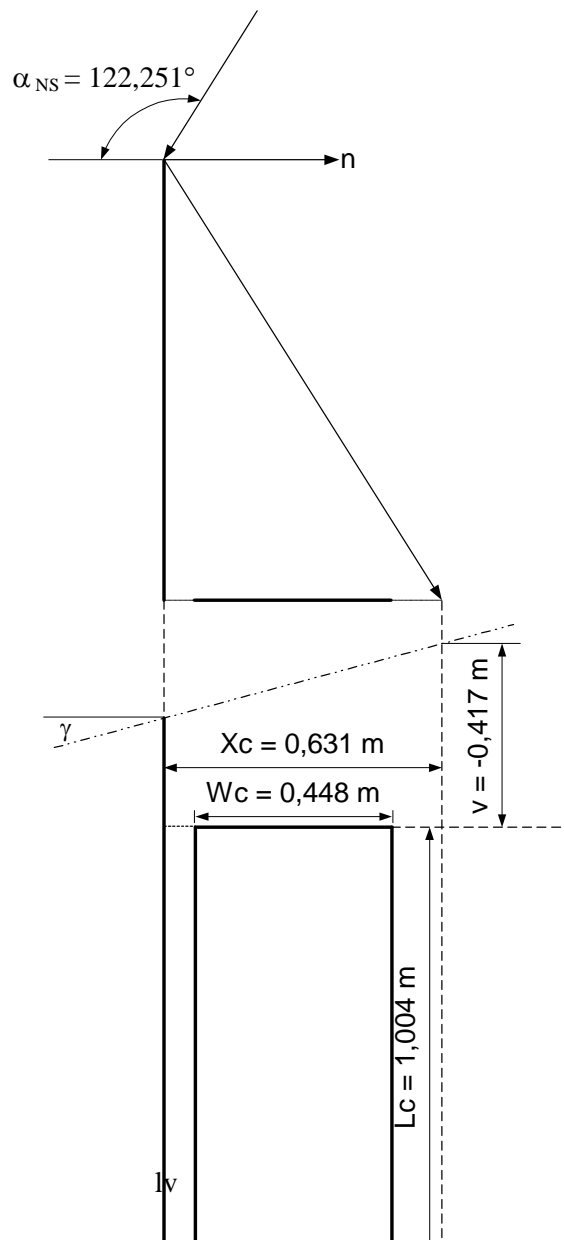
$$= 1 \text{ m}$$
- $$\Delta x = W_r \cos (\beta_r) - W_c \cos (\beta_c)$$

$$= 1 \cos (90^\circ) - 0,448 \cos (0^\circ)$$

$$= 0,448 \text{ m}$$

- $\text{Grad} = \Delta y / \Delta x$
 $= 2,232$
- $t = \frac{L_r}{\text{Tan } \gamma}$
 $= \frac{0,25}{\text{Tan } (-15^\circ)}$
 $= -0,926 \text{ m}$
- $S = \{W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c\} - (u + t)$
 $= (1 \cos 90^\circ + 0,631 \cos 0^\circ) - (1,557 - 0,926)$
 $= 0 \text{ m}$

Berikut ini gambar dimensi untuk contoh perhitungan diatas :



Gambar 4.5 Proyeksi sistem ke bidang utara selatan dan bidang horisontal

2. Menentukan Kriteria Sudut Altitude

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \text{Arctan (Grad)} \\ &= \text{Arctan (2,232)} \\ &= 65,868^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \beta_r \\ &= 90^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= \beta_r + 90^\circ \\ &= 180^\circ\end{aligned}$$

3. Menentukan Rasio Luasan Yang Terkena Radiasi Langsung (Beam)

Karena $\alpha_{NS} > \alpha_2$ Maka $AR_{ns} = 1$

4. Menentukan Rasio Luasan Yang Terkena Penguatan Reflektor (Reflekted Beam)

$$\text{Karena } \alpha_2 < \alpha_{NS} \leq \alpha_3 \text{ Maka } AR_r = \left[\frac{X_c \cdot L_c - \frac{(u \cdot v)}{2 \cdot \cos \beta_c}}{W_c \cdot L_c} \right]; AR_r = 2,194$$

Karena $AR_r > 1$ maka diambil $AR_r = 1$

Hasil perhitungan sistem sel surya-reflektor selanjutnya disajikan dalam tabel berikut :

Tabel 4.13. Hasil perhitungan sistem sel surya-reflektor untuk sel surya dengan reflektor 90°

Data	Radiasi (G _r) (W/m ²)	X _c (m)	v (m)	u (m)	s	AR _{ns}	AR _r
A1	400,095	0,883	-0,485	1,808	0	1	1
A2	415,762	0,863	-0,479	1,788	0	1	1
A3	442,333	0,840	-0,473	1,765	0	1	1
A4	450,409	0,818	-0,467	1,744	0	1	1
A5	489,087	0,770	-0,454	1,696	0	1	1
A6	504,696	0,753	-0,450	1,678	0	1	1
A7	535,455	0,741	-0,446	1,666	0	1	1
A8	544,619	0,729	-0,443	1,654	0	1	1
B1	612,044	0,677	-0,429	1,602	0	1	1
B2	665,913	0,644	-0,421	1,569	0	1	1
B3	671,783	0,638	-0,419	1,563	0	1	1
B4	672,480	0,631	-0,417	1,557	0	1	1
B5	700,833	0,624	-0,415	1,550	0	1	1
B6	736,115	0,607	-0,411	1,532	0	1	1
B7	744,704	0,600	-0,409	1,525	0	1	1
B8	741,130	0,594	-0,407	1,519	0	1	1

Tabel 4.14. Hasil perhitungan sistem sel surya-reflektor untuk sel surya dengan reflektor 60°

Data	Radiasi (G _r) (W/m ²)	X _c (m)	v (m)	u (m)	s	AR _{ns}	AR _r
A1	439,609	-3,899	0,663	-2,838	0,364	1	0
A2	453,632	-4,156	0,732	-3,104	0,373	1	0
A3	510,381	-4,756	0,892	-3,721	0,391	1	0
A4	508,650	-4,985	0,954	-3,956	0,397	1	0
A5	523,048	-5,236	1,021	-4,213	0,402	1	0
A6	565,591	-5,918	1,204	-4,907	0,415	1	0
A7	567,455	-6,203	1,280	-5,197	0,419	1	0
A8	617,000	-8,313	1,845	-7,328	0,441	1	0
B1	666,381	-9,151	2,070	-8,172	0,447	1	0
B2	686,048	-9,599	2,190	-8,623	0,449	1	0
B3	772,130	-23,782	5,991	-22,837	0,480	1	0
B4	747,083	-29,989	7,653	-29,047	0,484	1	0
B5	749,913	-34,904	8,971	-33,965	0,487	1	0
B6	764,000	-37,378	9,634	-36,440	0,487	1	0
B7	760,833	-42,231	10,934	-41,294	0,489	1	0

4.2.2.4. Menentukan Faktor Bentuk

1. Menentukan Faktor Bentuk Reflektor-Sel surya

$$\begin{aligned}
 F_{r-c} &= \frac{A_c \cdot F_{c-r}}{A_r} \\
 &= \frac{0,45 \times 0,365}{1,5} \\
 &= 0,109
 \end{aligned}$$

2. Menentukan Faktor Bentuk Sel Surya-Langit

$$\begin{aligned}
F_{c-s} &= 0,5(1 + \cos \beta_c) - F_{c-r} \\
&= 0,5(1 + \cos 0^\circ) - 0,365 \\
&= 0,635
\end{aligned}$$

3. Menentukan Faktor Bentuk Reflektor-Langit

$$\begin{aligned}
F_{r-s} &= 0,5(1 + \cos \beta_r) \\
&= 0,5(1 + \cos 90^\circ) \\
&= 0,5
\end{aligned}$$

4. Menentukan Faktor Bentuk Sel Surya-Tanah

$$\begin{aligned}
F_{c-g} &= 0,5(1 - \cos \beta_c) \\
&= 0,5(1 - \cos 0^\circ) \\
&= 0
\end{aligned}$$

5. Menentukan Faktor Bentuk Reflektor-Tanah

$$\begin{aligned}
F_{r-g} &= 0,5(1 - \cos \beta_r) - F_{r-c} \\
&= 0,5(1 - \cos 90^\circ) - 0,109 \\
&= 0,391
\end{aligned}$$

4.2.2.5. Menentukan Radiasi Yang Menimpa Akibat Penguatan Reflektor

1. Menentukan Radiasi Langsung (*Beam*) ke Sel Surya

$$\begin{aligned}
G_{T1} &= G_b \cdot R_b \cdot AR_{ns} \\
&= 432,436 \times 1 \times 1 \text{ W/m}^2 \\
&= 432,436 \text{ W/m}^2
\end{aligned}$$

2. Menentukan Pantulan Radiasi Langsung (*Beam*) Dari Reflektor ke Sel Surya

$$\begin{aligned}
G_{T2} &= G_b \cdot R_{br} \cdot AR_r \cdot \rho_r \\
&= 432,436 \times 0,499 \times 1 \times 0,85 \text{ W/m}^2 \\
&= 183,242 \text{ W/m}^2
\end{aligned}$$

3. Menentukan Radiasi Hambur (*Diffuse*) ke Sel Surya

$$\begin{aligned}
G_{T3} &= G_d \cdot F_{c-s} \\
&= 240,044 \times 0,635 \text{ W/m}^2 \\
&= 152,428 \text{ W/m}^2
\end{aligned}$$

4. Menentukan Pantulan Radiasi Hambur dari Reflektor ke Sel Surya

$$G_{T4} = G_d \cdot F_{r-s} \cdot \rho_r \cdot F_{c-r}$$

$$= 240,044 \times 0,5 \times 0,85 \times 0,365 \text{ W/m}^2$$

$$= 37,237 \text{ W/m}^2$$

5. Menentukan Radiasi Pantulan Tanah ke Sel Surya

$$G_{T5} = G \cdot \rho_g \cdot F_{c-g}$$

$$= 672,48 \times 0,5 \times 0 \text{ W/m}^2$$

$$= 0 \text{ W/m}^2$$

6. Menentukan Radiasi Pantulan dari Pantulan Tanah

$$G_{T6} = G \rho_g \cdot F_{r-g} \cdot \rho_r \cdot F_{c-r}$$

$$= 672,48 \times 0,6 \times 0,391 \times 0,85 \times 0,365 \text{ W/m}^2$$

$$= 48,890 \text{ W/m}^2$$

7. Menentukan Radiasi Total yang Menimpa ke Sel Surya

$$G_{Ttotal} = G_{T1} + G_{T2} + G_{T3} + G_{T4} + G_{T5} + G_{T6}$$

$$= (432,436 + 183,242 + 152,428 + 37,237 + 0 +$$

$$48,890) \text{ W/m}^2$$

$$= 854,233 \text{ W/m}^2$$

Hasil perhitungan perolehan radiasi yang diterima sel surya setelah ada penguatan reflektor selanjutnya disajikan dalam tabel berikut ini :

Tabel 4.15. Perolehan radiasi yang diterima setelah ada penguatan reflektor untuk sel surya dengan reflektor 90°

Data	G_{T1} (W/m ²)	G_{T2} (W/m ²)	G_{T3} (W/m ²)	G_{T4} (W/m ²)	G_{T5} (W/m ²)	G_{T6} (W/m ²)	G_{Ttotal} (W/m ²)	Penguatan Reflektor
A1	199,467	85,553	127,399	31,122	0	29,087	472,628	1,181
A2	213,318	90,737	128,552	31,404	0	30,226	494,237	1,189
A3	244,126	102,911	125,861	30,747	0	32,158	535,804	1,211
A4	241,073	100,852	132,929	32,473	0	32,745	540,072	1,199
A5	268,249	110,685	140,232	34,257	0	35,557	588,981	1,204
A6	279,105	114,755	143,251	34,995	0	36,692	608,797	1,206
A7	324,037	132,983	134,251	32,796	0	38,928	662,995	1,238
A8	327,643	134,300	137,779	33,658	0	39,594	672,975	1,236

B1	388,365	159,876	142,036	34,698	0	44,496	769,472	1,257
B2	441,839	184,943	142,287	34,760	0	48,413	852,241	1,280
B3	443,027	186,406	145,260	35,486	0	48,839	859,019	1,279
B4	432,436	183,242	152,428	37,237	0	48,890	854,233	1,270
B5	475,477	203,287	143,101	34,958	0	50,951	907,774	1,295
B6	511,777	226,600	142,455	34,800	0	53,516	969,149	1,317
B7	515,068	233,838	145,819	35,622	0	54,141	984,488	1,322
B8	495,164	237,949	156,188	38,155	0	53,881	981,338	1,324

Tabel 4.16. Perolehan radiasi yang diterima setelah ada penguatan reflektor untuk sel surya dengan reflektor 60°

Data	G _{T1} (W/m ²)	G _{T2} (W/m ²)	G _{T3} (W/m ²)	G _{T4} (W/m ²)	G _{T5} (W/m ²)	G _{T6} (W/m ²)	G _{Ttotal} (W/m ²)	Peguatan Reflektor
A1	335,507	0	86,197	3,805	0	26,933	452,441	1,029
A2	342,421	0	92,083	4,065	0	27,792	466,361	1,028
A3	406,684	0	85,861	3,790	0	31,269	527,604	1,034
A4	392,403	0	96,253	4,249	0	31,163	524,067	1,030
A5	405,700	0	97,164	4,289	0	32,045	539,198	1,031
A6	451,144	0	94,762	4,183	0	34,651	584,740	1,034
A7	444,615	0	101,712	4,490	0	34,766	585,582	1,032
A8	472,805	0	119,393	5,270	0	37,801	635,270	1,030
B1	540,043	0	104,608	4,618	0	40,826	690,095	1,036
B2	563,194	0	101,723	4,490	0	42,031	711,439	1,037
B3	612,498	0	132,176	5,835	0	47,305	797,813	1,033
B4	550,215	0	163,007	7,196	0	45,771	766,188	1,026
B5	545,076	0	169,605	7,487	0	45,944	768,112	1,024
B6	567,509	0	162,695	7,182	0	46,807	784,192	1,026
B7	554,554	0	170,799	7,539	0	46,613	779,506	1,025

4.2.3 Perhitungan Pasangan Arus dan Tegangan Teoritis

1. Menentukan *Kurva Fitting Parameter Referensi*

$$a_{ref} = \frac{\left(\mu_{Voc,ref} \cdot T_{c,ref} \right) - V_{oc,ref} + \varepsilon \cdot N_s}{\left(\frac{\mu_{Isc,ref} \cdot T_{c,ref}}{I_{L,ref}} \right) - 3}$$

$$= \frac{(-0,079 \times 298) - 21,2 + (1,12 \times 36)}{\left(\frac{8,4 \times 10^{-4} \times 298}{3,54} \right) - 3} \text{ (V)}$$

$$= 1,51 \text{ V}$$

2. Menentukan Hambatan Seri (*Series Resistant*)

$$R_s = 0,38 \text{ ohm} + \frac{a_{\text{ref}} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{\text{mp,ref}}}{I_{\text{L,ref}}} \right) - V_{\text{mp,ref}} + V_{\text{oc,ref}}}{I_{\text{mp,ref}}}$$

$$= 0,38 \text{ ohm} + \frac{1,51 \cdot \ln \left(1 - \frac{3,23}{3,54} \right) - 17 + 21,2}{3,23}$$

$$= 0,542 \text{ ohm}$$

3. Menentukan Dioda Reverse Saturation Current Referensi

$$I_{\text{o,ref}} = I_{\text{L,ref}} \exp \left(\frac{-V_{\text{oc,ref}}}{a_{\text{ref}}} \right)$$

$$= 3,54 \exp \left(\frac{-21,2}{1,51} \right)$$

$$= 2,818 \times 10^{-6} \text{ A}$$

4. Menentukan Kurva Fitting Parameter

$$a = a_{\text{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)$$

$$= 1,51 \left(\frac{75,92 + 273}{25 + 273} \right) \text{ V}$$

$$= 1,768 \text{ V}$$

5. Menentukan Arus Cahaya (*Light Current*)

$$I_L = \frac{G_{\text{Ttotal}}}{G_{\text{T,ref}}} \left[I_{\text{L,ref}} + \mu I_{\text{sc,ref}} (T_c - T_{c,\text{ref}}) \right]$$

$$= \frac{854,233}{1000} \left[3,54 + 8,4 \times 10^{-4} (348,92 - 298) \right]$$

$$= 3,061 \text{ A}$$

6. Menentukan Dioda Reverse Saturation Current

$$\begin{aligned} I_o &= I_{o,\text{ref}} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^3 \exp \left[\frac{\epsilon \cdot N_s}{a_{\text{ref}}} \left(1 - \frac{T_{c,\text{ref}}}{T_c} \right) \right] \\ &= 2,818 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{348,92}{298} \right)^3 \exp \left[\frac{1,12 \times 36}{1,51} \left(1 - \frac{298}{348,92} \right) \right] \text{ A} \\ &= 2,23 \times 10^{-4} \text{ A} \end{aligned}$$

7. Menentukan Persamaan Tegangan Keluaran Fungsi Arus

$$\begin{aligned} V(I) &= \left[-I R_s + \ln \left(\frac{-(I - I_L - I_o)}{I_o} \cdot a \right) \right] \\ V(I) &= \left[-I \times 0,542 + \ln \left(\frac{-(I - 3,06 - 2,23 \times 10^{-4})}{2,23 \times 10^{-4}} \cdot 1,768 \right) \right] \end{aligned}$$

Dari rumus diatas dengan memasukkan nilai sembarang untuk arus dapat diketahui tegangan teoritis yang dihasilkan oleh sel surya, sehingga grafik pasangan arus dan tegangan teoritis dapat dibuat, yang secara lengkapnya dapat dilihat dilampiran 5.

4.2.4 Perhitungan Efisiensi Elektris

4.2.4.1. Perhitungan Efisiensi Teoritis

1. Menentukan Efisiensi Daya Maksimum Teoritis

$$\begin{aligned} \eta_{\text{mp,teoritis}} &= \frac{I_{\text{mp,teoritis}} \cdot V_{\text{mp,teoritis}}}{A_c \cdot G_T} \\ &= \frac{2,62 \times 12}{0,45 \times 672,480} \\ &= 10,839 \% \end{aligned}$$

2. Menentukan Efisiensi Daya Maksimum Referensi

$$\begin{aligned}\eta_{mp,ref} &= \frac{I_{mp,ref} \cdot V_{mp,ref}}{A_c \cdot G_{T,ref}} \\ &= \frac{3,23 \cdot 17}{0,45 \cdot 1000} \\ &= 12,2\%\end{aligned}$$

3. Menentukan Koefisien Temperatur Efisiensi Daya Maksimum

$$\begin{aligned}\mu_{P,mp} &= \eta_{mp,ref} \left(\frac{\mu_{Voc,ref}}{V_{mp,ref}} \right) \\ &= 0,122 \frac{-0,079}{17} \text{ K}^{-1} \\ &= -5,673 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}\end{aligned}$$

4. Menentukan Efisiensi Temperatur

$$\begin{aligned}\eta_{teoritis} &= \eta_{mp,ref} \cdot + \mu_{p,mp} \left(T_c - T_{c,ref} \right) \\ &= 0,122 \cdot + -5,673 \cdot x 10^{-4} \cdot (348,92 - 298) \\ &= 9,311 \%\end{aligned}$$

4.2.4.2. Perhitungan Efisiensi Aktual

$$\begin{aligned}\eta_{mp} &= \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{A_c \cdot G_T} \\ &= \frac{2,51 \times 12,00}{0,45 \times 672,480} \\ &= 9,953 \%\end{aligned}$$

Lebih lengkapnya hasil perhitungan efisiensi teoritis dan aktual diberikan pada tabel berikut ini :

Tabel 4.17. Efisiensi sistem sel surya yang berdiri sendiri

Data	Radiasi Masukan (G_T) (W/m^2)	η_{aktual} sistem (%)	$\eta_{teoritis}$ sistem (%)	$\eta_{temperatur}$ (%)
A1	437,391	9,779	9,506	10,784
A2	453,368	9,648	9,468	10,731
A3	465,300	9,279	9,398	10,657

A4	478,474	9,247	9,418	10,659
A5	496,857	9,374	9,321	10,555
A6	520,000	9,056	9,220	10,452
A7	528,381	9,188	9,217	10,441
A8	558,909	9,250	9,092	10,307
B1	579,048	9,046	9,009	10,214
B2	597,286	9,101	8,982	10,177
B3	600,545	8,807	8,901	10,104
B4	648,913	8,921	8,901	10,071
B5	669,864	8,692	8,861	10,021
B6	670,545	8,695	8,753	9,923
B7	693,696	8,661	8,700	9,864
B8	672,652	8,526	8,511	9,704
C1	690,652	8,615	8,554	9,731
C2	680,522	8,542	8,606	9,783

Tabel 4.18. Efisiensi sistem sel surya dengan reflektor 90°

Data	Radiasi Masukan (G_T) (W/m^2)	$\eta_{\text{aktual sistem}}$ (%)	$\eta_{\text{teoritis sistem}}$ (%)	$\eta_{\text{temperatur}}$ (%)
A1	400,095	11,100	11,303	10,803
A2	415,762	11,235	11,256	10,679
A3	442,333	11,111	11,316	10,530
A4	450,409	10,941	11,032	10,418
A5	489,087	10,748	10,927	10,271
A6	504,696	10,632	10,876	10,195
A7	535,455	10,593	11,114	10,114
A8	544,619	10,479	10,925	10,006
B1	612,044	10,219	10,756	9,694
B2	665,913	9,819	10,670	9,460
B3	671,783	9,917	10,480	9,346
B4	672,480	9,953	10,389	9,311
B5	700,833	9,728	10,578	9,302
B6	736,115	9,416	10,276	8,936
B7	744,704	9,558	10,414	9,006
B8	741,130	9,831	10,675	9,191

Tabel 4.19. Efisiensi sistem sel surya dengan reflektor 60°

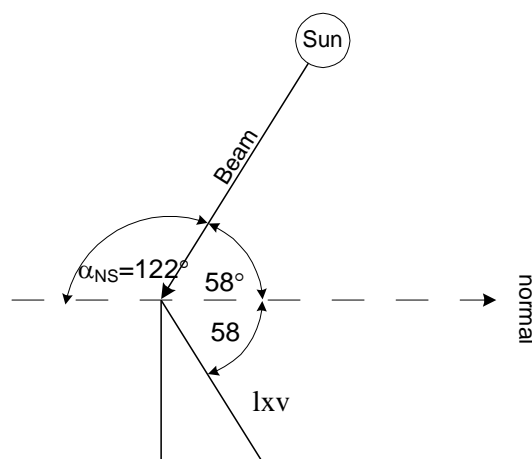
Data	Radiasi Masukan (G_T) (W/m^2)	$\eta_{\text{aktual sistem}}$ (%)	$\eta_{\text{teoritis sistem}}$ (%)	$\eta_{\text{temperatur}}$ (%)
A1	439,609	9,444	9,688	10,666
A2	453,632	9,369	9,477	10,520
A3	510,381	9,347	9,509	10,401

A4	508,650	9,234	9,428	10,359
A5	523,048	9,481	9,445	10,382
A6	565,591	9,137	9,475	10,333
A7	567,455	9,027	9,392	10,315
A8	617,000	9,197	9,317	10,220
B1	666,381	8,917	9,184	10,023
B2	686,048	8,866	9,127	9,936
B3	772,130	8,877	9,241	10,037
B4	747,083	8,468	8,526	9,479
B5	749,913	8,384	8,567	9,521
B6	764,000	8,325	8,482	9,440
B7	760,833	8,194	8,447	9,394

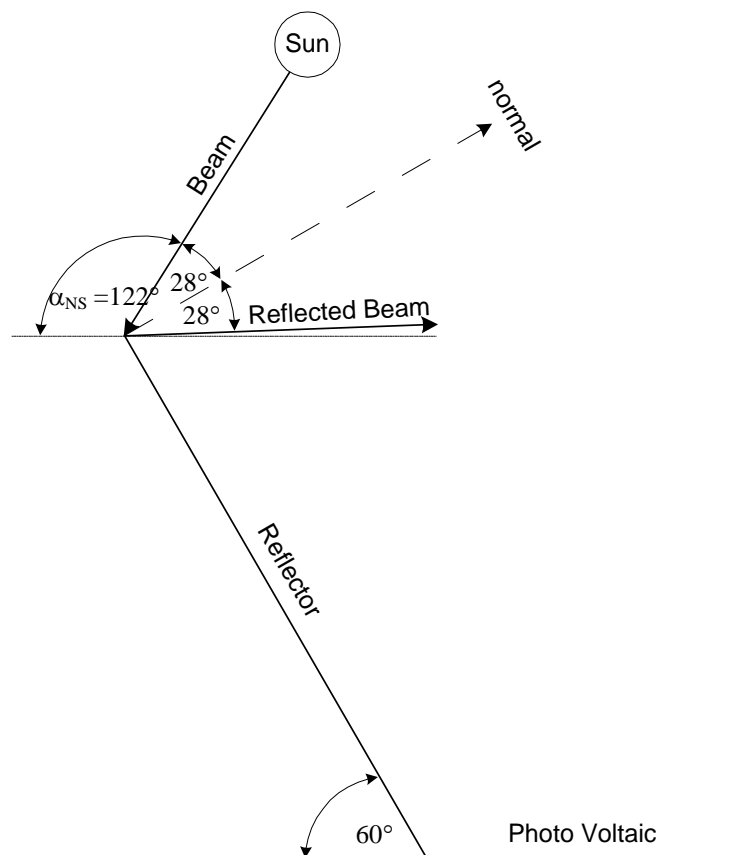
4.3. Pembahasan

4.3.1. Analisa Sistem Sel Surya-Reflektor

Dari hasil perhitungan radiasi yang diterima oleh sel surya dengan penambahan reflektor dapat diperoleh hasil bahwa reflektor dengan sudut kemiringan 90° menghasilkan penambahan radiasi yang lebih besar dibandingkan dengan reflektor dengan sudut kemiringan 60° . Hal ini disebabkan karena dengan reflektor 90° sel surya mendapat penambahan radiasi langsung (*beam*) dari pantulan reflektor (*reflected beam*) sedang pada reflektor 60° tidak. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut ini yang diambil pada data penelitian B5 untuk reflektor 90° dan B3 untuk reflektor 60° dimana kedua data tersebut mempunyai α_{NS} yang sama.

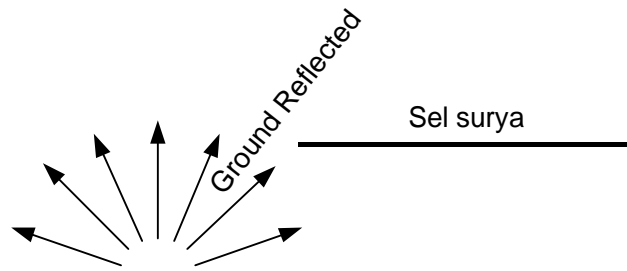


Gambar 4.6 Proyeksi sistem sel surya-reflektor 90° ke bidang utara selatan



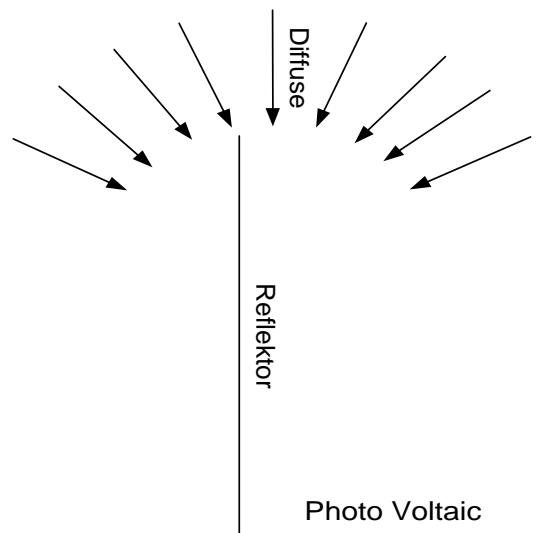
Gambar 4.7. Proyeksi sistem sel surya-reflektor 60° ke bidang utara selatan

Dari hasil perhitungan penambahan radiasi pada kedua sistem sel surya-reflektor dan sistem sel surya yang berdiri sendiri dapat di ketahui bahwa ketiganya tidak mendapatkan penambahan radiasi dari pantulan tanah (*ground reflected*), hal ini dikarenakan sel surya dalam posisi horisontal.

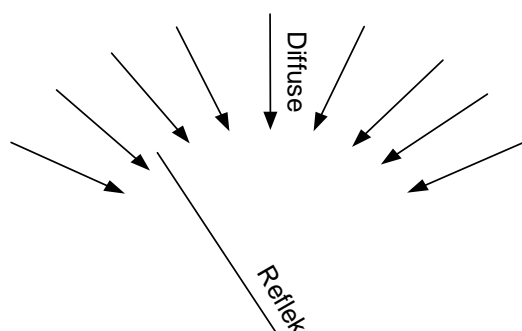


Gambar 4.8. Pengaruh *ground reflected* pada sel surya

Dari hasil perhitungan juga diketahui bahwa dalam sistem sel surya-reflektor terjadi pengurangan radiasi hambur (*diffuse*) yang masuk ke sel surya, hal ini disebabkan karena sebagian radiasi hambur (*diffuse*) terhalang oleh adanya reflektor, dengan semakin besarnya sudut kemiringan reflektor maka semakin besar pula pengurangan radiasi hambur yang diterima sel surya dibandingkan dengan tanpa menggunakan reflektor.



Gambar 4.9. Pengurangan radiasi hambur (*diffuse*) ke sel surya pada reflektor 90°

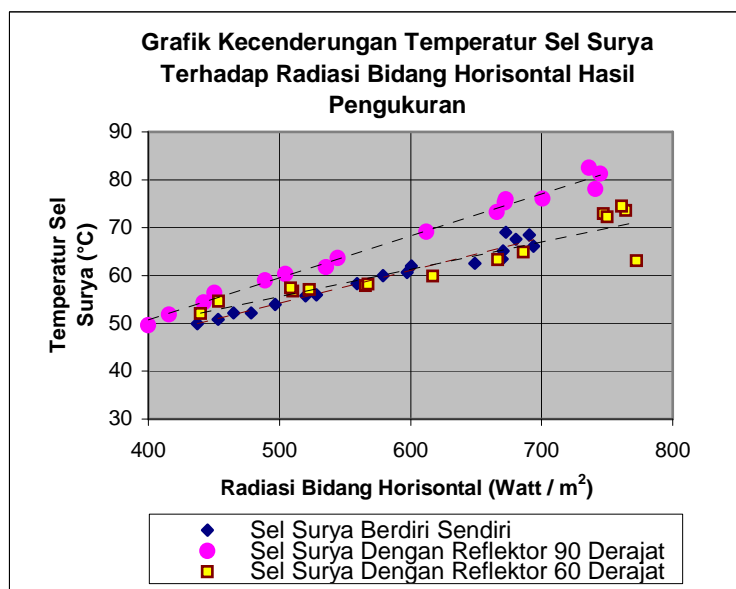


Gambar 4.10. Pengurangan radiasi hambur (*diffuse*) ke sel surya pada reflektor 60°

4.3.2. Analisa Pengaruh Reflektor Terhadap Temperatur Sel Surya

Dari data hasil penelitian dan perhitungan radiasi yang diterima sel surya dapat diketahui bahwa kecenderungan temperatur sel surya dipengaruhi oleh besarnya radiasi yang diterima sel surya, dengan kata lain semakin besar radiasi yang diterima sel surya temperatur sel surya cenderung akan meningkat.

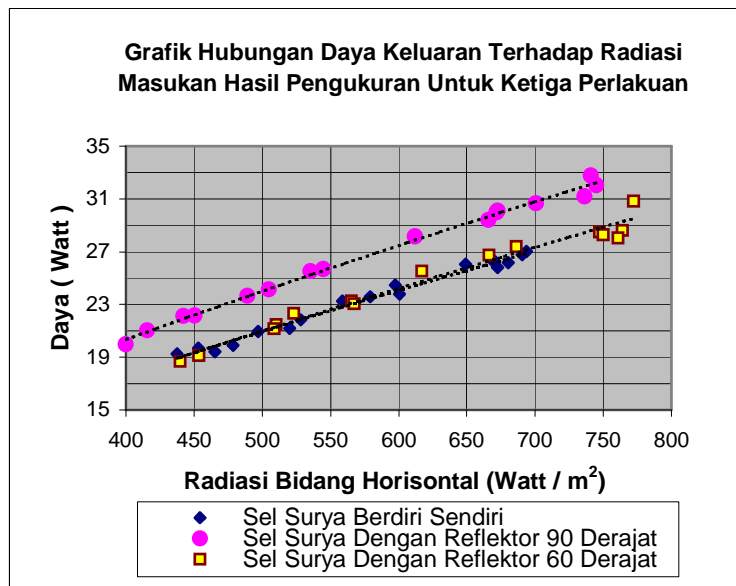
Seperti dijelaskan pada analisa sebelumnya reflektor 90° memberikan penambahan radiasi lebih besar dibandingkan dengan reflektor 60°, hal ini mengakibatkan temperatur sel surya dengan reflektor 90° lebih besar dibandingkan dengan temperatur sel surya dengan reflektor 60° pada tingkat radiasi bidang horisontal yang sama. Sedangkan sel surya dengan reflektor 60° mempunyai temperatur yang hampir sama dengan sel surya yang berdiri sendiri, hal ini disebabkan penambahan radiasi pada reflektor 60° sangat kecil. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik hubungan kecenderungan radiasi bidang horisontal hasil pengukuran terhadap temperatur sel surya masing-masing perlakuan berikut ini.



Grafik 4.1 Kecenderungan temperatur sel surya terhadap radiasi bidang horisontal

4.3.3. Analisa Pengaruh Penambahan Reflektor Terhadap Daya Keluaran Sel Surya.

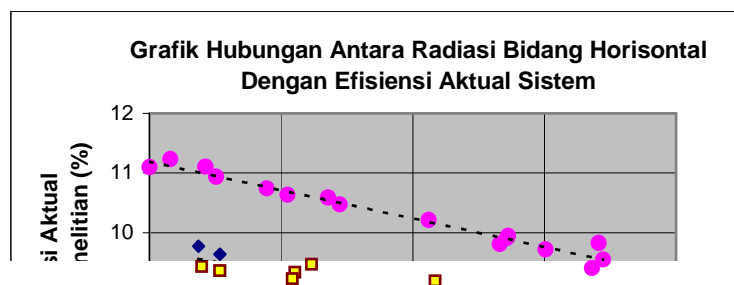
Penggunaan reflektor 90° memberikan peningkatan radiasi yang diterima sel surya lebih besar dibandingkan dengan reflektor 60°. Dengan adanya peningkatan radiasi yang diterima tersebut pada tingkat radiasi masukan yang sama memberikan kecenderungan peningkatan daya keluaran sel surya yang lebih besar pada sel surya dengan reflektor 90° dibandingkan dengan pada sel surya dengan reflektor 60° maupun sel surya yang berdiri sendiri. Hal ini dapat dijelaskan pada grafik hubungan antara daya keluaran dengan radiasi bidang horisontal hasil pengukuran sebagai berikut.



Grafik 4.2 Hubungan daya keluaran terhadap radiasi bidang horisontal

4.3.4. Analisa Efisiensi Sistem Penelitian

Berikut ini merupakan grafik hubungan antara efisiensi sistem dengan radiasi bidang horisontal masing-masing sistem penelitian.

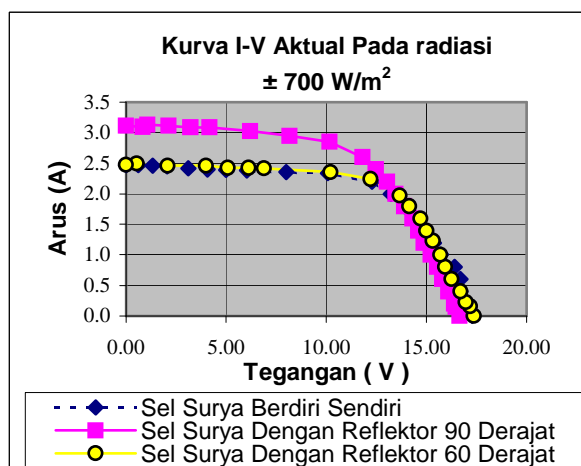


Grafik 4.3 Hubungan efisiensi terhadap radiasi bidang horisontal

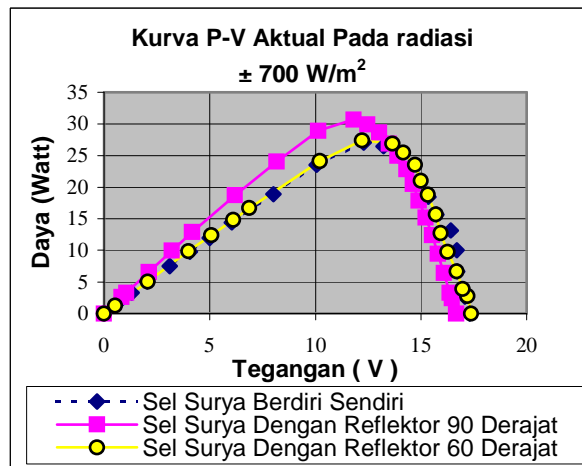
Dari grafik diatas efisiensi pada sistem sel surya dengan reflektor 90° paling tinggi dibandingkan dengan efisiensi pada sistem yang lain, karena pada sistem ini menghasilkan daya keluaran yang lebih besar pada tingkat radiasi bidang horisontal hasil pengukuran yang sama dibandingkan dengan sistem yang lain.

Grafik diatas juga menunjukkan bahwa efisiensi aktual untuk tiap sistem penelitian akan menurun seiring dengan kenaikan radiasi bidang horisontal, akan tetapi jika dikaji ulang penurunan efisiensi lebih disebabkan oleh kenaikan temperatur sel surya akibat kenaikan radiasi yang diterima sel surya. Karena pengurangan efisiensi daya maksimum lebih cenderung disebabkan pengurangan tegangan maksimum.

Berikut ini grafik perbandingan antara sistem penelitian untuk tingkat radiasi masukan yang relatif konstan, data B7 untuk sel surya berdiri sendiri, data B5 untuk sel surya dengan reflektor 90° dan B2 untuk sel surya dengan reflektor 60°.



Grafik 4.4 Karakteristik arus-tegangan pada radiasi bidang horisontal $\pm 700 \text{ W/m}^2$



Grafik 4.5 Karakteristik daya-tegangan pada radiasi bidang horisontal $\pm 700 \text{ W/m}^2$

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa penggunaan reflektor 90° dapat meningkatkan arus maksimum keluaran sel surya akan tetapi menurunkan tegangan maksimum, kenaikan arus maksimum lebih disebabkan kenaikan radiasi yang diterima sel surya dan penurunan tegangan maksimum lebih disebabkan karena kenaikan temperatur sel surya.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari pembahasan diatas dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada radiasi bidang horisontal yang relatif sama, dalam penelitian dengan reflektor 90° (tanggal 11 Juni 2003) dihasilkan penambahan radiasi rata-rata 25% dan untuk penelitian dengan reflektor 60° (tanggal 12 Juni 2003) dihasilkan penambahan radiasi 3%.

2. Penambahan radiasi oleh reflektor menyebabkan penambahan temperatur sel surya, karena radiasi surya tidak hanya berupa photon yang digunakan untuk masukan sel surya akan tetapi juga merupakan radiasi thermal. Peningkatan temperatur sel surya tersebut mengakibatkan penurunan tegangan keluaran sel surya.
3. Pada radiasi bidang horisontal yang relatif sama efisiensi dan daya keluaran sistem sel surya dengan reflektor 90° paling tinggi dibandingkan dengan kedua sistem yang lain.
4. Karakteristik arus-tegangan pada sistem sel surya dengan reflektor 90° cenderung mengalami peningkatan arus hubung pendek dan arus daya maksimum, selain itu cenderung mengalami penurunan tegangan rangkaian terbuka dan tegangan daya maksimum.
5. Karena sel surya berfungsi sebagai sumber daya listrik dengan energi masukan yang gratis maka besarnya daya keluaran lebih diutamakan dari pada efisiensi sel surya.

5.2. Saran

Peneliti menyadari kekurang sempurnaan dalam melakukan penelitian ini untuk itu dalam penelitian lebih lanjut diperlukan :

1. Sebagai usaha dalam peningkatan radiasi masukan ke sel surya maka penelitian tentang reflektor perlu dilakukan guna mendapatkan sistem reflektor yang paling optimal.
2. Dalam usaha peningkatan daya keluaran dan efisiensi sel surya maka perlu dilakukan suatu penelitian penambahan sistem pendinginan pada sel surya.
3. Dalam penempatan titik pengukuran temperatur lingkungan hendaknya jangan terlalu dekat dengan sel surya karena pengaruh pantulan radiasi yang

diakibatkan reflektor dapat mengakibatkan kenaikan temperatur sensor suhu sehingga tidak mewakili temperatur lingkungan secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

Bollentin, Joseph W, dan Richard D. Wilk, “*Modeling The Solar Irradiation On Flat Plate Collectors Augmented With Planar Reflektor*”, Pergamon Press, New York, 1995.

Duffie, John A, dan Beckman, William A, “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, John Wiley and Sons, New York, 1991.

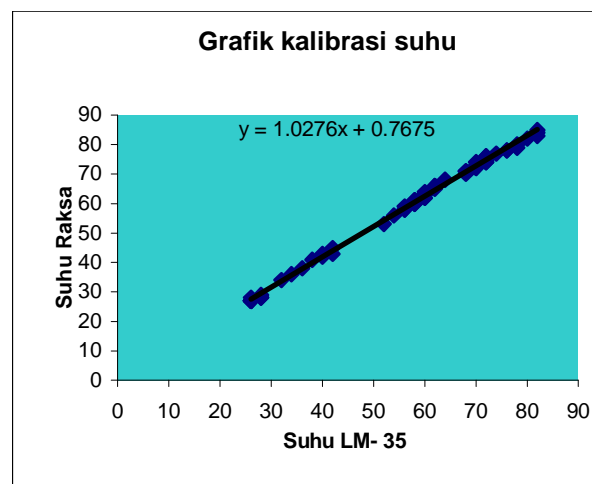
Holman, J.P, “*Perpindahan Kalor*”, Erlangga Jakarta, 1995.

Tripanagnostopoulos, dan P.Yianoulis, “*Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System*”, Pergamon Press, New York, 2002.

LAMPIRAN 6

Kalibrasi sensor suhu

sensor LM-35	termo raksa	sensor LM-35	termo raksa
26	27	62	66
26	27	62	66
26	27	64	68
26	27	68	70
26	27	68	71
26	27	68	71
28	28	70	72
28	28	70	72
28	28	70	73
28	29	70	74
32	34	72	74
34	36	72	74
36	38	72	75
38	41	72	75
40	42	72	76
40	43	72	76
42	43	74	77
42	45	76	78
52	53	76	78



54	56	78	79
56	58	78	80
56	58	80	82
56	59	82	83
58	60	82	84
58	60	82	85
58	61	84	87
58	61	84	87
58	61	84	88
58	61	86	89
60	62	86	89
60	62	86	89
60	63	88	89
60	63	88	89
60	63	90	89
60	64	92	91
62	65	94	91