



Perancangan Prototip *Solar Water Pump System*

Supartono Soediatno, Anita Supartono, dan Luki Matias Kurniawan

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Maranatha, Bandung

Jl. Suria Sumantri 65, Bandung 40164, Indonesia

supartono@eng.maranatha.edu, anita_stono@yahoo.com

Abstrak: Pada perancangan prototip *Solar Water Pump System* ini dijelaskan mengenai perhitungan spesifikasi minimum dari komponen-komponen dalam sistem; berapa lama beban dapat beroperasi, lamanya waktu pengisian accu, dan berapa besar sudut kemiringan dari panel surya sehingga energi radiasi matahari dapat diterima secara maksimal. Hal ini bergantung pada spesifikasi arus, tegangan, dan frekuensi operasi dari beban. Komponen-komponen yang direalisasikan adalah regulator seri dan inverter gelombang persegi. Prototip sistem pompa air tenaga surya ini dapat beroperasi dengan pemakaian accu 20% dari kapasitasnya selama 20 menit. Dalam hal ini diperlukan waktu selama empat jam untuk mengisi kembali accu yang sudah digunakan sebanyak 20% dari kapasitasnya dengan arus pengisian 0,3125A. Sudut kemiringan untuk Bandung adalah sebesar 15° terhadap utara.

Kata kunci: panel surya, pompa air, fix tilt angle, regulator seri, inverter gelombang persegi

Abstract: This prototype design of a *Solar Water Pump System*, explains about the minimum specification calculation of the components in the system; how long the load can operates, the length of accu charge time, and how far tilt angle should be so that the solar radiation energy could be received maximally by the solar panel. It depends on the voltage, current and operation frequency of the load specifications. The developed components were: series regulator and a square wave inverter. The *Solar Water Pump System* prototype can operates with a 20% accu capacity discharged for 20 minutes. It takes four hours to recharge the 20% accu capacity with a current of 0.3125A. The Bandung's fix tilt angle is 15° for north.

Keywords: solar panel, water pump, fix tilt angle, series regulator, square wave inverter

I. PENDAHULUAN

Tenaga matahari dapat digunakan untuk berbagai tujuan, salah satunya untuk menghasilkan listrik yang disebut sebagai *solar electricity*. Salah satu aplikasinya yaitu untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga seperti halnya pompa air. *Solar Water Pump System* bisa digunakan untuk memenuhi kebutuhan air di daerah terisolir yang belum mendapatkan pelayanan listrik PLN. Sedangkan untuk daerah perkotaan, *Solar Water Pump System* dapat

digunakan untuk penghematan biaya listrik maupun sebagai cadangan energi listrik pada saat PLN tidak beroperasi.

II. TEORI PENUNJANG

II.1. Solar Radiation

Semua objek dengan temperatur di atas nol derajat, mutlak memancarkan energi (radiasi) ke lingkungan sekitar. Energi tersebut dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Sedangkan Intensitas radiasi yang dipancarkan permukaan matahari dapat dihitung dengan menggunakan Hukum Stefan–Boltzmann^[1], sebagai berikut:

$$I = e\sigma T^4 \quad (1)$$

dengan I : intensitas radiasi (Wm^{-2})

e : emisivitas (untuk benda mengkilap $e \approx 0$, sedangkan untuk *blackbody* $e = 1$)

σ : konstanta Stefan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

T : temperatur absolut (K)

Peak sun hour didefinisikan sebagai jumlah jam per hari dengan *irradiance* 1000Wm^{-2} , yang memberikan energi yang sama mulai matahari terbit sampai terbenam. Enam *peak sun hour* berarti energi yang diterima oleh permukaan bumi, disaat matahari bersinar selama enam jam dengan *irradiance* 1000Wm^{-2} .

Intensitas radiasi matahari bervariasi mulai dari inti sampai permukaannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak, fenomena ini dikenal dengan nama *Inverse Square Law*^[2]. Pengukuran mengindikasikan bahwa intensitas radiasi matahari yang diterima di luar atmosfer bumi (*extraterrestrial radiation*) relatif konstan.

Hal tersebut dikenal dengan nama *solar constant*^[3], yaitu sebesar 1367Wm^{-2} . Jarak bumi-matahari yang tidak konstan, mengakibatkan nilai *solar constant* sedikit bervariasi pada sekitar ($1300 \text{Wm}^{-2} < \text{solar constant} < 1390 \text{Wm}^{-2}$).

II.2. Tilt Angle

Intensitas radiasi matahari yang diterima suatu lokasi di permukaan bumi merupakan fungsi dari sudut yang dibentuk oleh sinar datang matahari dengan permukaan bumi. Intensitas sinar matahari pada siang hari lebih besar dibandingkan intensitas sinar matahari pada pagi atau sore hari, karena sinar matahari tersebar pada daerah yang lebih luas. Persentase intensitas radiasi matahari untuk sinar datang membentuk sudut ϕ terhadap permukaan dapat dinyatakan dengan rumus berikut ini^[1]:

$$\% \text{Intensitas} = \sin \phi \times 100\% \quad (2)$$

Adanya variasi *solar altitude* dapat mengakibatkan intensitas radiasi matahari yang diterima pada siang hari tidak maksimum. Intensitas radiasi matahari akan maksimum pada siang hari bila *solar panel* membentuk sudut 90° terhadap matahari. Sudut yang dibentuk antara permukaan dengan solar panel agar *irradiance* pada siang hari maksimum dikenal dengan nama

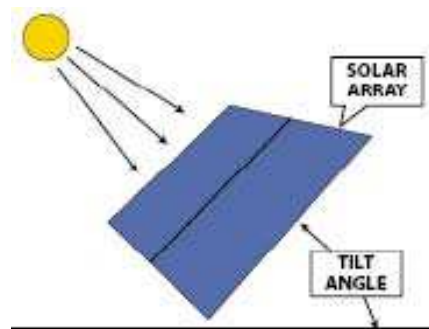
tilt angle. Matahari terbit dari timur dan terbenam di barat, karena itu *tilt angle* umumnya diorientasikan menghadap utara ataupun selatan. Biasanya untuk area yang berada di belahan bumi utara, *tilt angle* diorientasikan menghadap selatan, sedangkan untuk area yang berada di belahan bumi selatan, *tilt angle* diorientasikan menghadap utara. Besarnya *tilt angle* berkaitan dengan *solar altitude* dan dapat diperkirakan dengan rumus sebagai berikut^[12]:

$$\alpha = 90^\circ - A \tag{3}$$

dengan α : *tilt angle* (°)

A : solar altitude (°)

Tilt angle diusahakan minimum sebesar 15° agar air hujan dan gaya gravitasi dapat membersihkan debu yang menempel pada *solar array* yang dapat mengakibatkan berkurangnya energi listrik yang dihasilkan.



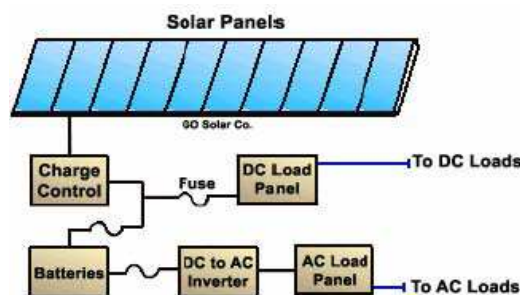
Gambar 1. *Tilt Angle*

II.3. Solar Cell (Photovoltaic Cell)

A. Solar Electricity System

Solar Electricity System mempunyai tiga bentuk dasar, yaitu: ^{[4],[5],[6]}

1) Stand Alone / “Cabin” System

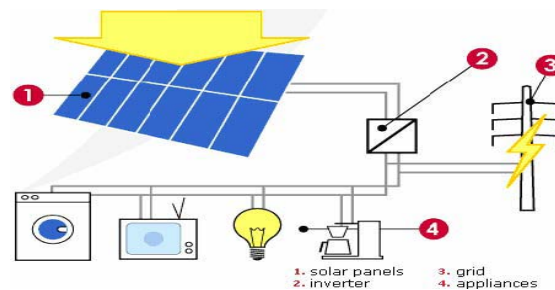


Gambar 2. *Stand Alone / “Cabin” System*

Umumnya digunakan untuk daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik (terisolir). Biasanya diperlukan penampung energi listrik berupa baterai, yang berguna untuk memenuhi kebutuhan listrik pada malam hari dan saat *solar panel* tidak memproduksi listrik.

2) *Grid-Connected System*

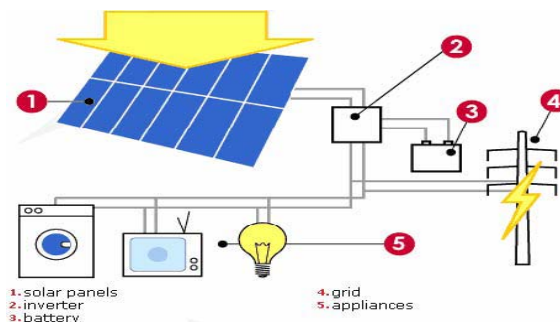
Umumnya digunakan untuk daerah yang terhubung dengan jaringan listrik, tetapi menginginkan sumber listrik yang ramah lingkungan. Sistem ini dapat mengurangi biaya iuran listrik. Biasanya sistem ini tidak memerlukan baterai sebagai penampung cadangan energi listrik.



Gambar 3. *Grid-Connected System*

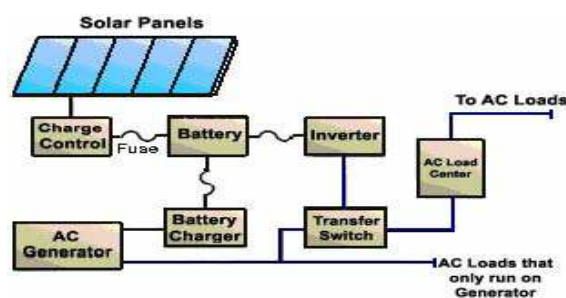
3) *Back-Up System*

Umumnya digunakan untuk daerah yang terhubung dengan jaringan listrik, tetapi memiliki kualitas listrik yang buruk. Sistem ini dapat digunakan untuk menyediakan energi listrik ketika jaringan listrik padam. Biasanya sistem ini memerlukan baterai sebagai penampung cadangan energi listrik.



Gambar 4. *Back-Up System*

4) *Hybrid System* adalah penggabungan *Solar Electric System* dengan sumber energi lain (seperti *generator diesel*, pembangkit listrik tenaga angin) dalam rangka menyediakan sumber energi yang handal dan dapat memproduksi listrik ketika energi matahari tidak mencukupi.



Gambar 5. *Hybrid System*

B. Prinsip Kerja Solar Cell

Ketika sinar matahari mengenai *solar cell*, ada 3 kemungkinan dapat terjadi, yaitu^[7]:

1) photon melewati *solar cell*

Ini umumnya terjadi bila energi photon lebih kecil daripada energi *bandgap* dari *solar cell*, karena energi photon tidak cukup untuk mengeksitasi elektron.

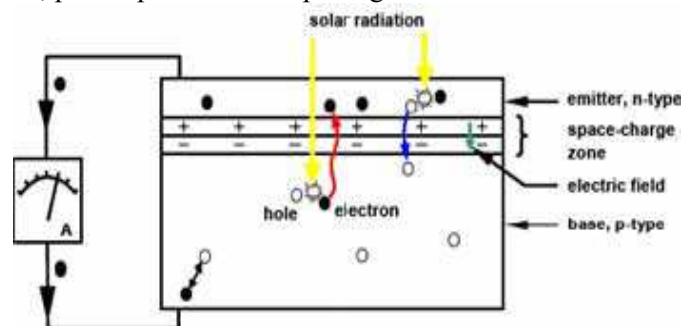
2) photon dipantulkan oleh permukaan *solar cell*

Sekitar 30% sinar yang mengenai Silikon dipantulkan. Oleh karena itu biasanya *solar cell* dilengkapi dengan lapisan anti refleksi.

3) photon diserap *solar cell*

Ini umumnya terjadi jika energi photon lebih besar daripada energi *bandgap solar cell*. Photon dengan energi yang lebih besar daripada energi *bandgap* akan mengalami *loss* pada saat konversi energi. Hal tersebut disebabkan adanya surplus energi yang diubah menjadi energi panas pada *solar cell*.

Hanya photon yang diserap *solar cell* yang akan menghasilkan energi. Photon dengan energi yang cukup pada permukaan *solar cell* akan menembus *emitter*, *space-charge zone* dan sampai di *base*. Pasangan elektron-*hole* akan terbentuk melalui proses penyerapan energi photon. Ketika photon diserap *solar cell*, energinya akan digunakan untuk memutuskan ikatan kovalen. Energi yang diserap oleh elektron pada *valence band* akan membuatnya berpindah ke *conduction band* dan menjadi elektron yang bebas bergerak dalam semikonduktor. Hilangnya keberadaan elektron pada ikatan kovalen mengakibatkan terbentuknya *hole*. Selama *solar cell* terkena sinar matahari, proses pembentukan pasangan elektron-*hole* bebas akan terus terjadi.



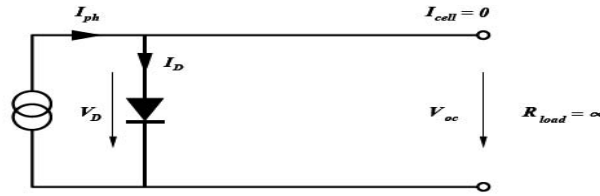
Gambar 6. Cara Kerja Solar Cell

Penyerapan photon di *emitter* dan *base* mengakibatkan terbentuknya pasangan elektron-*hole*. *Minority charge carrier* *emitter* yaitu *hole* dan *minority charge carrier* *base* yaitu elektron berdifusi mencapai ujung *space-charge zone*. Keberadaan medan listrik yang kuat di *space-charge zone* akan mempercepat elektron menuju *emitter* dan mempercepat *hole* mencapai *base*. Jika *emitter* dan *base* dihubungkan dengan beban, elektron dari *emitter* akan mengalir melalui beban menuju *base* dan melakukan *recombination* dengan *hole* di *base*. Ini berarti arus mengalir kontinyu selama sinar matahari yang mengenai *solar cell*, tetap ada. Sebagai hasilnya radiasi matahari diubah menjadi listrik.

Ketika terminal *solar cell* di “*open-circuit*” ($R_{Load} = \infty$), arus output menjadi nol ($I_{Cell} = 0$). Sehingga seluruh *photocurrent* mengalir ke dioda. Dalam keadaan ini tegangan *solar cell* maksimum. Nilai V_{OC} meningkat secara logaritmik dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari. Tegangan *open-circuit* (V_{OC}) dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$V_{OC} = V_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (4)$$

dengan $V_T = \frac{KT}{q}$ adalah *thermal voltage*



Gambar 7. Rangkaian Ekuivalen Solar Cell Open-Circuit

II.4. Accu

Daya yang dihasilkan *solar cell* sukar diperkirakan. Daya bervariasi antara nol sampai maksimum yang tidak tergantung pada kebutuhan, sehingga dibutuhkan komponen penyimpanan energi berupa baterai. Salah satu jenis baterai yang dapat dimanfaatkan untuk menunjang *Solar Electricity System* adalah *accu*, yang performansinya dibutuhkan tetap stabil untuk jangka waktu yang lama.

Karakteristik Accu

Accu 12 V terdiri dari enam *cell* yang di “seri” dengan tegangan terminal *cell* sekitar 2,12 V pada saat “penuh” dan bernilai sekitar 1,75 V pada saat “kosong”. Perbedaan tegangan antara *cell* “penuh” dan *cell* “kosong” yang kecil merupakan salah satu keunggulan *accu* dibandingkan baterai lainnya.

Bervariasinya tegangan terminal berdasarkan kondisi kerja, didasarkan atas fakta bahwa konsentrasi elektrolit berubah selama *charging* dan *discharging*. *Equilibrium voltage* dapat diperkirakan dengan persamaan empiris berikut:^[8]

$$V_E = V_K + \text{konsentrasi elektrolit (g.cm}^{-3}\text{)} \quad (5)$$

dengan V_E : *equilibrium voltage* (V)

V_K : 0,84 - 0,88 (tergantung jenis *accu*)

State of Charge (SOC) merupakan parameter yang menunjukkan seberapa “penuh” *accu*. Tegangan sebenarnya dari *accu* tergantung pada temperatur *accu*. *Accu* yang dingin akan memberikan tegangan yang lebih rendah saat penuh dibandingkan dengan *accu* yang panas.

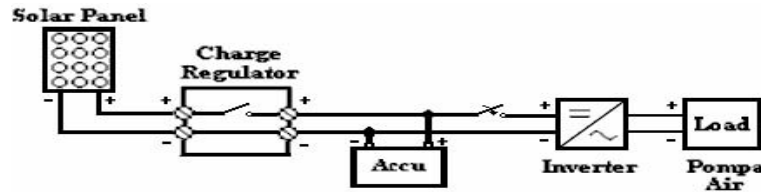
Saat *discharge*, level tegangan minimum yang dapat diterima *accu* didefinisikan sebagai *discharge voltage threshold*. Saat tegangan *accu* dibawah *discharge voltage threshold* disebut *deep discharge*. *Depth of Discharge* (DOD) adalah ukuran seberapa “dalam” *accu discharge*. Ketika *accu* 100% “penuh”, DOD-nya 0%, sebaliknya ketika *accu* 100% “kosong” DOD-nya 100%.

Pada saat *accu discharge*, ada hal yang perlu diperhatikan yaitu nilai *discharge* sebaiknya tidak melebihi nilai DOD *accu*, karena hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada *accu*.

III. PERANCANGAN *PROTOTYPE*

III.1. *Solar Water Pump System Prototype*

Pada *prototype* ini, aliran daya dari *solar panel* diatur oleh *charge regulator* yang digunakan untuk *charge accu*. *Charge regulator* berfungsi untuk memproteksi *accu* terhadap *overcharge* agar kemungkinan kerusakan *accu* dapat diminimalkan. Setelah *accu* terisi “penuh”, inverter dapat dijalankan untuk mengubah tegangan DC menjadi AC guna mengoperasikan pompa air.



Gambar 8. Diagram Blok *Solar Water Pump System Prototype*

Pada sistem ini, *solar panel* tidak dapat mengoperasikan beban secara langsung. Energi yang dihasilkan *solar panel* disimpan dahulu dalam *accu* yang untuk selanjutnya digunakan untuk mengoperasikan beban. Kelebihan sistem ini adalah *solar panel* yang dibutuhkan berdaya kecil, sehingga biaya investasi awal untuk *solar panel* dapat diminimalkan. Keberadaan *accu* membuat sistem dapat mengoperasikan beban lebih fleksibel dengan kinerja beban lebih dipengaruhi oleh kondisi *accu* dibandingkan besarnya *irradiance*. Kekurangan sistem ini adalah efisiensinya rendah karena adanya *loss* pada saat konversi energi listrik menjadi energi elektrokimia dan juga sebaliknya.

III.2. *Analisa Sistem*

A. *Spesifikasi Minimum Komponen Sistem*

Agar *prototype Solar Water Pump System* dapat beroperasi dengan baik, maka :

1) *inverter*

Untuk input *inverter* berasal dari *accu* $12V_{DC}$ dengan tegangan beban $220V_{AC}$ maka dibutuhkan *inverter* $12V_{DC} - 220V_{AC}$

Frekuensi kerja *inverter* harus sesuai dengan frekuensi kerja beban, yaitu sebesar 50Hz. \Rightarrow

$$f_{inverter} = 50\text{Hz}$$

Agar dapat mengoperasikan beban dengan daya 20W, maka dibutuhkan *inverter* dengan daya lebih dari 20W. $\Rightarrow P_{inverter} > 20W$

Spesifikasi minimum : $12 V_{DC} - 220 V_{AC}, 50\text{Hz}, P_{inverter} > 20W$

2) *charge regulator*

Untuk dapat meregulasi proses *charge accu* $12 V_{DC}$, maka diperlukan *charge regulator* $12 V_{DC}$.

Untuk kapasitas *accu* 5Ah dengan *rate of discharge* C/10, maka diperlukan *charge regulator* yang mampu menangani arus sebesar 0.5A ($5/10 = 0,5$).

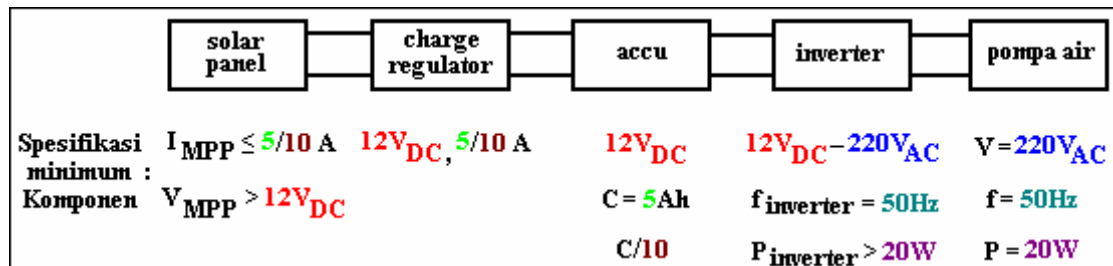
Spesifikasi minimum : $12 V_{DC}, 0,5A$

3) *solar panel*

Agar dapat men-*charge accu* $12 V_{DC}$, maka V_{MPP} *solar panel* harus lebih besar daripada tegangan terminal *accu*. $\Rightarrow V_{MPP} > 12 V_{DC}$.

Untuk *accu* dengan kapasitas 5Ah dan *rate of discharge* C/10, maka sebaiknya *charge* dengan dengan arus maksimal sebesar 0,5A ($5/10 = 0,5$). $\Rightarrow I_{MPP} \leq 0,5A$.

Spesifikasi minimum : $V_{MPP} > 12 V_{DC}$, $I_{MPP} \leq 0,5A$



Gambar 9. Analisa Spesifikasi Komponen

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa prototip *Solar Water Pump System* membutuhkan:

- 1) *inverter* dengan spesifikasi minimum $12V_{DC} - 220 V_{AC}$, 50Hz, $P_{inverter} > 20W$
- 2) *charge regulator* dengan spesifikasi minimum : $12V_{DC}$, 0,5A dan
- 3) *solar panel* dengan spesifikasi minimum : $V_{MPP} > 12V_{DC}$, $I_{MPP} \leq 0,5A$

B. Perkiraan Lama Beban Beroperasi dan Lama Charge Accu

Lama beban beroperasi dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan Peukert, yaitu sebagai berikut:

- 1) Hitung besar arus yang diambil dari accu (I_{ACCU}) untuk beban tertentu

$$I_{ACCU} = \frac{P_{LOAD}}{\eta_{INVERTER} \times V_{ACCU}} \quad (6)$$

- 2) Hitung lama beban dapat beroperasi dengan DOD 100%

$$T_{(DOD100\%)} = \frac{C \times (C/R)^{n-1}}{(I_{ACCU})^n} \quad (7)$$

- 3) Untuk meminimalkan kemungkinan kerusakan, maka sebaiknya *accu discharge* tidak melebihi rating DOD-nya. Berikut ini perhitungan lama beban dapat beroperasi dengan DOD X%

$$T_{(DODX\%)} = \frac{X}{100} T_{(DOD100\%)} \quad (8)$$

Perkiraan lama waktu *charge accu* dengan DOD X% dapat dilihat pada perhitungan dibawah ini :

- 1) Hitung kapasitas *accu* yang terpakai pada DOD X%

$$C_{(DODX\%)} = \frac{X}{100} C_{(DOD100\%)} \quad (9)$$

- 2) Untuk mencegah *accu* dari *overcharge*, maka besar arus *charge* sebaiknya tidak melebihi *rate of discharge accu*. Berikut ini perhitungan lama waktu *charge accu* dengan DOD X% dengan menggunakan arus *charge* tertentu

$$T_{Charge(DODX\%)} = \frac{C_{(DODX\%)}}{I_{Charge}} \quad (10)$$

C. Perhitungan Tilt Angle

Besar energi output yang dihasilkan *Solar Electricity System* bervariasi berdasarkan jumlah *irradiance* yang mengenai *solar panel*. Semakin besar *irradiance* maka energi output semakin besar pula. Besarnya *irradiance* bervariasi berdasarkan musim, waktu dan lokasi.

Dalam perancangan prototip *Solar Water Pump System* sebaiknya diperhitungkan juga besarnya *tilt angle* agar sudut yang dibentuk *solar panel* dengan *irradiance* pada siang hari (ketika *irradiance* maksimum) bernilai 90° , sehingga *irradiance* yang diterima *solar panel* maksimum. Berikut ini perhitungan besar *tilt angle* untuk kota Bandung yang terletak pada belahan bumi selatan, tepatnya pada *latitude* $6,9^\circ$ LS.

1) *winter solstice*

Pada saat *winter solstice*, kutub selatan bumi condong menghadap matahari dengan sudut kemiringan $23,5^\circ$. Karena kecondongan kutub bumi sama dengan *latitude* Bandung yaitu pada belahan bumi selatan maka $D = +23,5^\circ$

solar altitude $\rightarrow A = 90^\circ - L +/- D = 90^\circ - 6,9^\circ + 23,5^\circ = 106,6^\circ$ (acuan kutub utara bumi)

tilt angle $\rightarrow \alpha = 90^\circ - A = 90^\circ - 106,6^\circ = -16,6^\circ$ FN (*tilt angle* $-16,6^\circ$ FN setara dengan $16,6^\circ$ FS)

2) *vernal equinox* dan *autumnal equinox*

Pada saat *vernal equinox* dan *autumnal equinox*, kutub bumi tidak condong menghadap matahari, maka $D = 0^\circ$

solar altitude $\rightarrow A = 90^\circ - L +/- D = 90^\circ - 6,9^\circ +/- 0^\circ$

$A = 83,1^\circ$ (acuan kutub utara bumi)

tilt angle $\rightarrow \alpha = 90^\circ - A = 90^\circ - 83,1^\circ$
 $= 6,9^\circ$ FN

3) *summer solstice*

Pada saat *Summer Solstice* kutub utara bumi condong menghadap matahari dengan sudut kemiringan $23,5^\circ$. Karena kecondongan kutub bumi tidak sama dengan *latitude* Bandung yaitu pada belahan bumi selatan maka $D = -23,5^\circ$

Solar altitude $\rightarrow A = 90^\circ - L +/- D = 90^\circ - 6,9^\circ - 23,5^\circ$
 $= 59,6^\circ$ (acuan kutub utara bumi)

Tilt angle $\rightarrow \alpha = 90^\circ - A = 90^\circ - 59,6^\circ$
 $= 30,4^\circ$ FN

Keterangan :

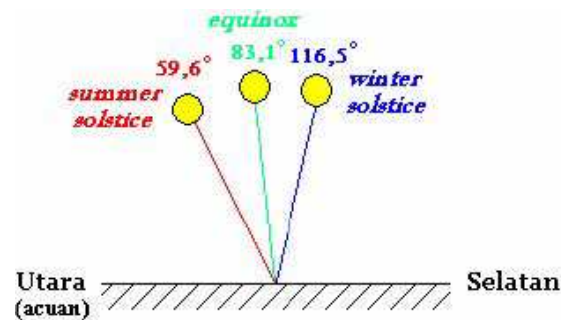
Bandung terletak pada belahan bumi selatan, maka acuan *solar altitude* pada kutub utara bumi dan *tilt angle* diorientasikan menghadap utara (FN).

TABEL 1. TILT ANGLE DI BANDUNG SELAMA PERIODE SOLSTICE DAN EQUINOX

	<i>winter solstice</i>	<i>Equinox</i>	<i>summer solstice</i>
<i>declination</i> (D)	$+23,5^\circ$	0°	$-23,5^\circ$
<i>solar altitude</i> (A)	$106,6^\circ$	$83,1^\circ$	$59,6^\circ$
<i>tilt angle</i> (α)	$-16,6^\circ$ FN	$6,9^\circ$ FN	$30,4^\circ$ FN

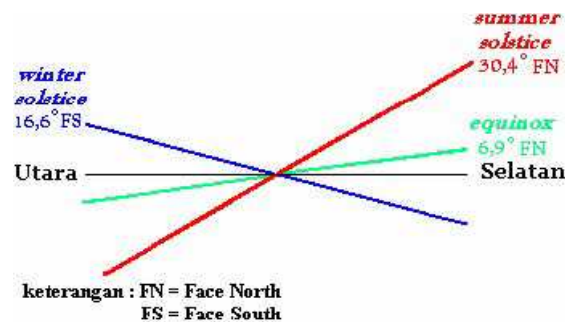
Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa *solar altitude* tahunan di Bandung bervariasi secara periodik mulai pada ketinggian $116,5^\circ$ (acuan utara bumi) pada saat *winter solstice*, lalu bergerak turun sampai $83,1^\circ$ saat *vernal equinox*. Pada saat *summer solstice*, *solar*

altitude berada pada ketinggian $59,6^\circ$ dan mulai bergerak naik sampai $83,1^\circ$ saat *autumnal equinox* dan proses ini kembali berulang secara periodik.



Gambar 10. Ilustrasi Variasi Solar Altitude di Bandung

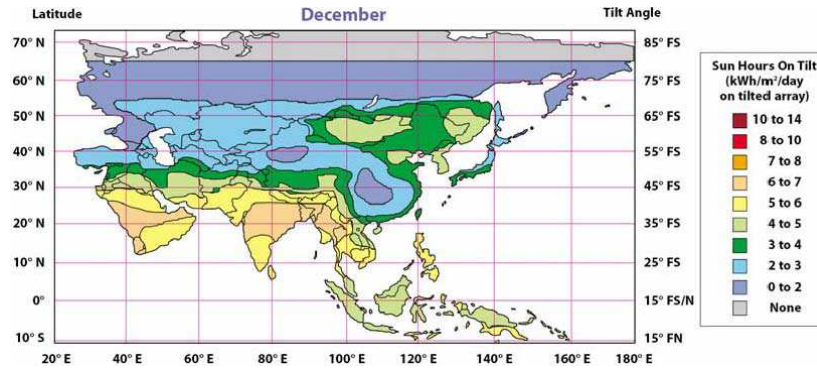
Sama seperti *solar altitude*, *tilt angle* untuk kota Bandung bervariasi mulai dari $16,6^\circ$ FS saat *winter solstice*, lalu bergerak menghadap ke utara sampai sejajar dengan permukaan dan akhirnya berada pada sudut $6,9^\circ$ FN saat *vernal equinox*. Selanjutnya *tilt angle* bertambah hingga menuju $30,4^\circ$ FN saat *summer solstice* dan berkurang hingga bernilai $6,9^\circ$ FN saat *autumnal equinox* dan proses ini kembali berulang secara periodik.



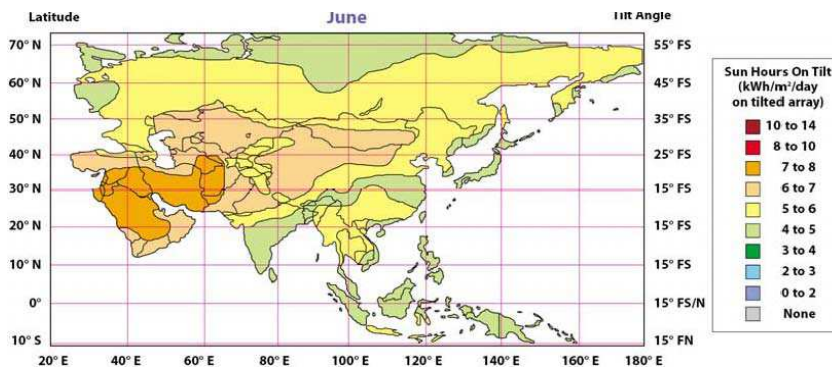
Gambar 11. Ilustrasi Tilt Angle di Bandung

Daerah pada belahan bumi utara, umumnya *irradiance* maksimum terjadi pada bulan Juni (antara *equinox* dan *summer solstice*) dan *irradiance* minimum terjadi pada bulan Desember (antara *equinox* dan *winter solstice*). Sedangkan untuk daerah pada belahan bumi selatan, *irradiance* maksimum dan minimumnya terjadi berkebalikan dengan belahan bumi utara. Untuk daerah belahan bumi selatan, *irradiance* maksimum umumnya terjadi pada bulan Desember dan *irradiance* minimum umumnya terjadi pada bulan Juni. Karena alasan tersebut, biasanya perancangan *Solar Electricity System* didasarkan pada kedua kondisi ekstrem tersebut.

Umumnya *Solar Electricity System* dirancang agar tetap dapat bekerja pada saat kondisi terburuk, yaitu ketika *irradiance* paling minim. Dengan perancangan seperti ini maka pada kondisi lainnya, kinerja sistem akan lebih baik karena tingkat *irradiance* yang lebih baik. Umumnya untuk daerah pada belahan bumi utara, perancangan *Solar Electricity System* berdasarkan pada peta *sun hour* bulan Desember. Sedangkan untuk daerah pada belahan bumi selatan, perancangan *Solar Electricity System* berdasarkan pada peta *sun hour* bulan Juni.



Gambar 12. Peta Sun Hour untuk Wilayah Asia pada Bulan Desember^[9]



Gambar 13. Peta Sun Hour untuk Wilayah Asia pada Bulan Juni^[9]

Pada *Solar Electricity System* yang minimalis, kinerja sistem yang baik sepanjang tahun dengan perawatan yang minimum dapat dicapai dengan cara membuat *tilt angle fix*. Besarnya *fix tilt angle* umumnya terletak diantara *tilt angle* maksimum saat *winter solstice* dan *summer solstice*. *Fix tilt angle* dapat diperkirakan berdasarkan nilai rata-rata *tilt angle* pada saat *winter solstice* dan *summer solstice*, yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{fix tilt angle} &= [\text{tilt angle}_{(\text{winter solstice})} + \text{tilt angle}_{(\text{summer solstice})}] / 2 \\
 &= [-16,6^\circ \text{ FN} + 30,4^\circ \text{ FN}] / 2 = 6,9^\circ \text{ FN}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Pada *tilt angle* yang rendah solar panel dapat tertutup dengan debu yang berdampak pada berkurangnya energi *ouput* yang dihasilkan, sehingga disarankan besarnya *tilt angle* minimum adalah 15°. Hal tersebut bertujuan agar hujan dan gaya gravitasi dapat menjaga *solar panel* tetap bersih. Karena alasan teknis tersebut, maka besar *fix tilt angle* di Bandung adalah 15° FN.

III.3. Series Regulator

Pada perancangan prototipe *Solar Water Pump System* ini, *charge controller* yang direalisasikan berupa *series regulator* 12V_{DC}, *switch* yang menghubungkan seri *solar panel* dengan *accu* dikendalikan untuk mengatur aliran daya sekaligus berfungsi sebagai HVD (*High Voltage Disconnect*) yang memproteksi *accu* terhadap *overcharge*. *Regulator* ini dilengkapi dengan resistor variabel untuk men-set nilai *float voltage* yang berfungsi untuk menentukan batas atas tegangan *accu* saat *charge*.

Equalizer dari regulator berfungsi untuk membuat semua sel dalam *accu* bermuatan sama sehingga dapat mencegah terbentuknya *sulphation layer* pada elektroda yang dapat mengurangi

kemampuan *accu* dalam menyimpan dan mengeluarkan energi.

Thermistor berfungsi sebagai kompensasi temperatur otomatis untuk *charge accu* yang lebih baik di setiap *range* temperatur.

Series regulator ini merupakan *regulator* 12 V_{DC} dengan kemampuan menangani arus solar panel maksimal sebesar 12A. Besar *rating* arus tersebut ditentukan oleh *rating* dari *switch* semikonduktor Q₂ yang hanya dapat menangani arus maksimum sampai 12A. Jika *series regulator* digunakan untuk *charge accu* dengan arus *rate of discharge* C/20, maka kapasitas *accu* maksimum yang dapat ditangani oleh *series regulator* sebesar 240Ah (20 x 12 = 240).

Regulator ini dilengkapi dengan dua *switch* semikonduktor, yaitu:

- 1) transistor Q₃ yang berfungsi sebagai *solar activation*
 - a) *switch on* bila tegangan solar panel > *voltage threshold dioda zener* D₁
 - b) *switch off* bila tegangan solar panel < *voltage threshold dioda zener* D₁.
- 2) P-MOSFET Q₂ yang berfungsi sebagai *charge current switch*
 - a) *switch on* bila tegangan *accu* < *float voltage*
 - b) *switch off* bila tegangan *accu* > *float voltage*

Ada tiga kemungkinan dalam *charge accu*, yaitu:

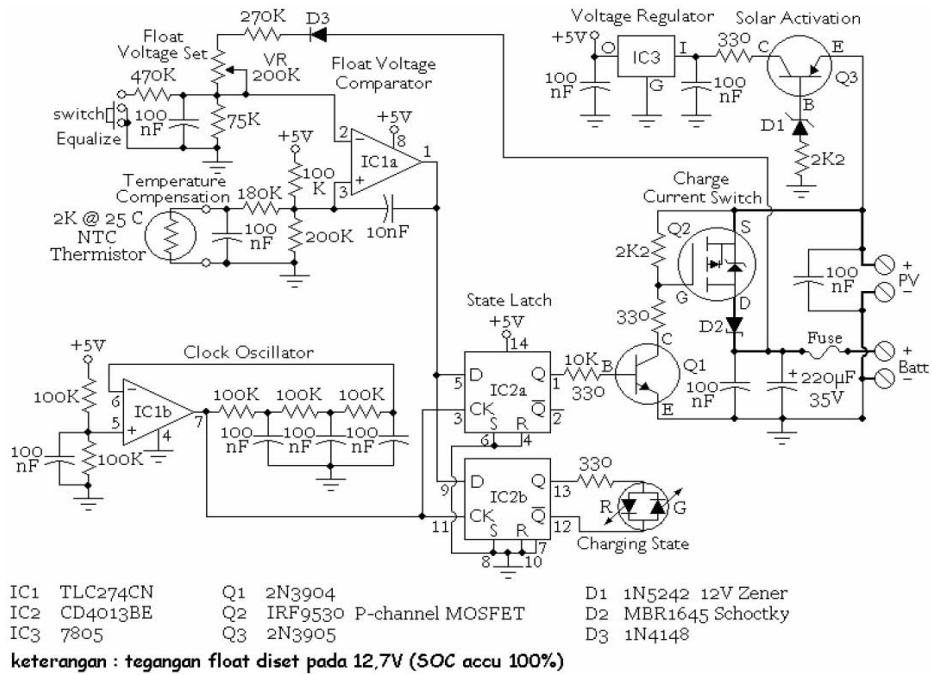
Pada Gambar 14, ketika tegangan *solar panel* lebih besar dari 12V_{DC}, dioda zener D₁ akan konduksi dan mengaktifkan transistor Q₃. Tegangan output Q₃ diregulasi oleh IC₃ sehingga didapat tegangan 5V_{DC}, yang digunakan untuk men-*drive* IC₁ dan IC₂. IC_{1a} berfungsi sebagai *comparator* yang membandingkan tegangan *accu* terhadap tegangan referensi (*float voltage*).

Thermistor berguna sebagai *offset* hasil perbandingan untuk kompensasi temperatur. Output IC_{1a} akan *high* jika tegangan *accu* di bawah seting *float voltage* dan sebaliknya akan *low* jika tegangan *accu* di atas seting *float voltage*. IC_{1b} berfungsi sebagai *clock oscillator*.

Sinyal dari IC_{1a} menjadi input untuk pasangan D *flip-flop* (IC₂) dengan *clock* berasal dari output IC_{1b}. IC₂ menghasilkan sinyal *square* dengan frekuensi yang sinkron dengan frekuensi *clock oscillator*. IC_{2b} berfungsi untuk men-*drive* LED indikator kondisi *charge*, yaitu sebagai berikut:

1. LED merah on menandakan tegangan *accu* < *float voltage*, pada keadaan ini *accu* akan di-*charge* dengan arus konstan
2. LED hijau on menandakan tegangan *accu* > *float voltage*, pada keadaan ini *accu* tidak di-*charge*
3. LED hijau dan merah menyala secara bergantian menandakan *accu charge* dengan arus berupa pulsa, dengan amplitudo dan lebar antar pulsa bervariasi.

IC_{2a} berfungsi untuk men-*drive* rangkaian *switch* untuk *on* atau *off*, karena IC_{2a} sukar untuk men-*drive* langsung *switch* MOSFET, arus listrik dari IC_{2a} diperkuat dahulu oleh transistor Q₁ melalui rangkaian Darlington. Dioda D₂ berguna untuk mencegah *accu discharge* saat beban tidak beroperasi. *Fuse* F₁ berguna untuk mencegah arus *accu* berlebih mengalir yang dapat mengakibatkan kerusakan *regulator*.

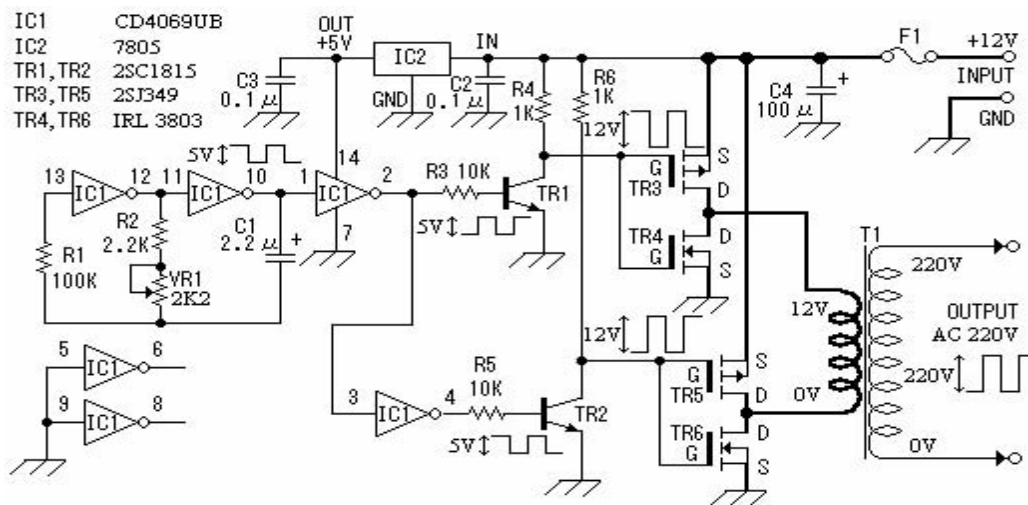


Gambar 14. Skema Series Regulator^[10]

III.4. Square Wave Inverter

Pada perancangan prototipe *Solar Water Pump System* ini, inverter yang direalisasikan berupa *square wave inverter* 12V_{DC} – 220V_{AC} dengan switch MOSFET. Besarnya daya yang dapat ditangani inverter ini ditentukan oleh *rating transformer* yang digunakan juga *rating arus* dari *switch semikonduktor*. *Switch semikonduktor* TR₃ dan TR₅ memiliki rating arus terkecil yaitu maksimum sebesar 20A. Jadi daya maksimum yang dapat ditangani inverter ini sebesar 240VA (12V_{AC} x 20A).

Tegangan input dari *accu* diregulasi oleh IC₂ sehingga didapat tegangan 5V_{DC} yang digunakan untuk men-drive IC₁. IC₁ merupakan CMOS *logic inverter*, sebagian *logic inverter* pada IC₁ dibentuk dalam konfigurasi *RC oscillator* dengan penambahan resistor dan kapasitor.



Gambar 15. Skema Square Wave Inverter^[11]

IV. DATA PENGAMATAN

IV.1. Pengukuran Series Regulator

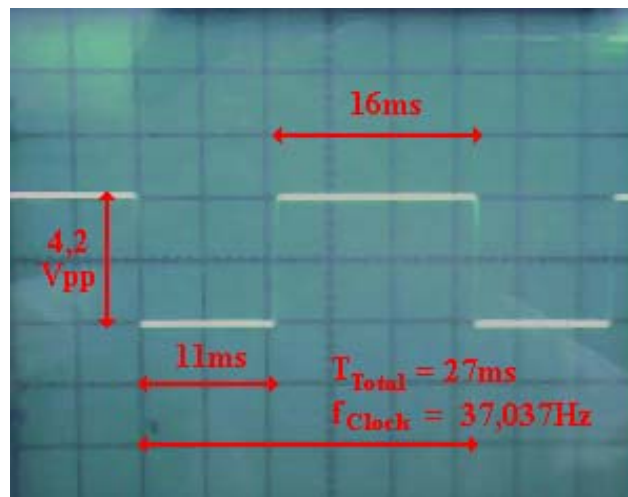
Pengukuran *series regulator* dilakukan dengan cara memberikan variasi input tegangan *series regulator*. Dari Tabel 2 terlihat bahwa dibutuhkan tegangan input $> 15V_{DC}$ agar *series regulator* dapat aktif. Untuk tegangan input $< 15V_{DC}$, *solar activation* dan *voltage regulator* tidak aktif sehingga tidak dapat men-*drive float voltage comparator*, *clock oscillator* dan *state latch*. Oleh karena itu dalam hal ini dibutuhkan *solar panel* dengan $V_{MPP} > 15V_{DC}$.

TABEL 2. PENGUKURAN SERIES REGULATOR

Tegangan Data Input Pengukuran	$V_{\text{solar panel}} < 15V$	$V_{\text{solar panel}} > 15V$	
		$10,5V \leq V_{\text{accu}} \leq 12,7V$	$V_{\text{accu}} > 12,7V_{DC}$
$V_{\text{Voltage Regulator}}$	$0V_{DC}$	$5V_{DC}$	
$V_{\text{Comparator}}$	$0V_{DC}$	$4,2V_{DC}$	$0V_{DC}$
$V_{\text{Clock Oscillator}}$	$0V_{AC}$	$4.2V_{PP}$	

Pengukuran $V_{\text{Comparator}}$ dilakukan dengan cara mensimulasikan variasi input tegangan *accu* dengan *DC power supply* mulai dari SOC *accu* 0% ($10,5V_{DC}$) hingga SOC *accu* 100% ($12,7V_{DC}$). Untuk melihat apakah HVD (*High Voltage Disconnect*) *series regulator* berfungsi maka tegangan *accu* disimulasikan $> 12,7V_{DC}$. Dari Tabel 2 terlihat bahwa pada saat *series regulator* aktif ($V_{\text{solar panel}} > 15V_{DC}$) dan tegangan *accu* berkisar antara $10,5V_{DC}$ hingga $12,7V_{DC}$ maka output *comparator* bernilai $4,2 V_{DC}$, sedangkan untuk tegangan *accu* lebih besar dari $12,7V_{DC}$ maka output *comparator* bernilai $0V_{DC}$.

Dari hal tersebut terlihat bahwa HVD (*High Voltage Disconnect*) *series regulator* dapat berfungsi untuk memproteksi *accu* terhadap *overcharge*.



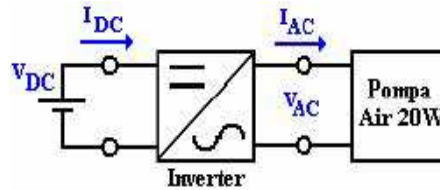
Gambar 16. Sinyal Clock Series Regulator

Dari hasil pengukuran, sinyal clock *series regulator* memiliki amplituda $4,2 V_{pp}$ dengan frekuensi cukup rendah yaitu sebesar $37,03 \text{ HZ}$ (periode 27 ms). Frekuensi *switch semikonduktor* sinkron dengan frekuensi *clock*, *switch semikonduktor* MOSFET memiliki kecepatan on-off sebesar 27 ms .

IV.2. Pengukuran Square Wave Inverter

Efisiensi dari *square wave inverter* yang direalisasikan dapat dihitung dengan cara mengukur besar arus dan tegangan pada input dan output *inverter*, kemudian dihitung dengan rumus berikut ini:

$$\begin{aligned}
 P_{output} &= \eta \times P_{input} \\
 V_{AC} \times I_{AC} &= \eta \times V_{DC} \times I_{DC} \\
 \eta &= \frac{V_{AC} \times I_{AC}}{V_{DC} \times I_{DC}}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$



Gambar 17. Gambar untuk Perhitungan Efisiensi Inverter

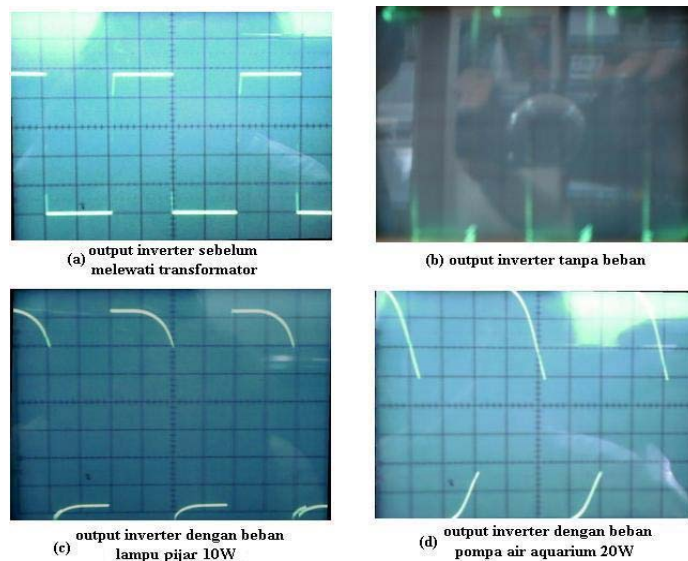
Dari pengukuran diperoleh data sebagai berikut : $V_{DC} = 12,7V$ $V_{AC} = 218V$
 $I_{DC} = 1,53A$ $I_{AC} = 85mA$

maka besarnya efisiensi *square wave inverter* adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{V_{AC} \times I_{AC}}{V_{DC} \times I_{DC}} = \frac{218 \times 0,085}{12,7 \times 1,53} = 95,363\%$$

Square wave inverter yang direalisasikan memiliki efisiensi sebesar 95,363 %.

Dari Gambar 18 terlihat bahwa sinyal output inverter sebelum melewati transformator berbentuk *square* dengan kualitas sinyal yang cukup baik. Tetapi setelah melewati transformator, sinyal output berbentuk *square* dengan sedikit *ripple* pada bagian atas dan bawahnya. Untuk beban resistif berupa lampu pijar 10W terlihat bentuk sinyal output *square* mengalami perubahan berupa lekukan pada ujung atas dan bawah sinyal. Sedangkan untuk beban pompa air 20W, bentuk sinyal berubah cukup drastis hingga membentuk sinyal *rounded*.

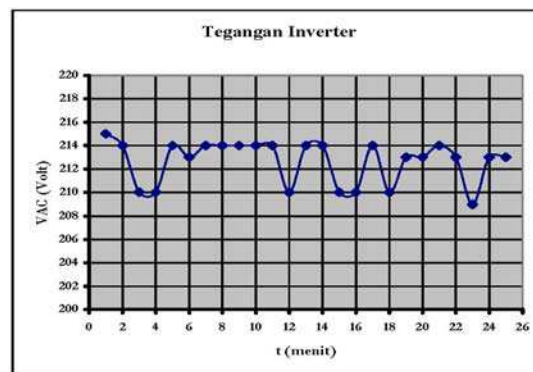


Gambar 18. Sinyal Output Square Wave Inverter

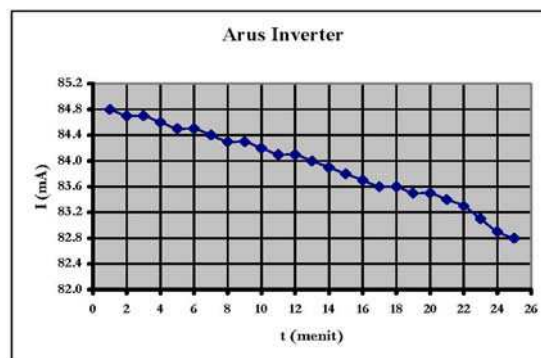
IV.3. Lama Discharge Accu

Pada bagian ini akan diukur penskalaan dari lamanya waktu *discharge accu*. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk membandingkan lamanya *discharge accu* secara teoritis dengan kenyataannya dan melihat seberapa besar penyimpangan yang terjadi.

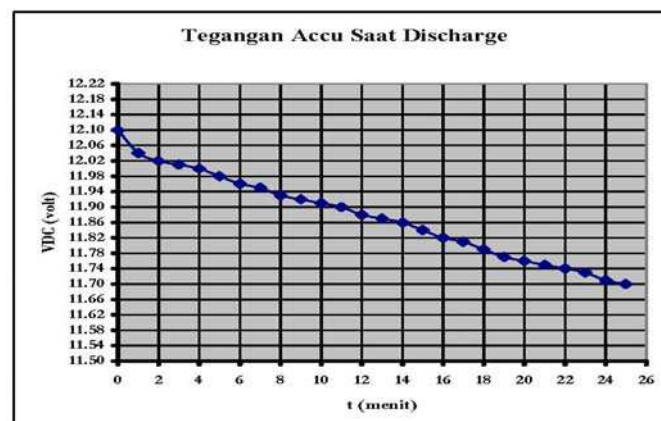
Dari data hasil pengukuran terlihat bahwa untuk *accu* jenis *starter batteries*, saat pertama kali dihubungkan dengan beban, tegangan *accu* berkurang cukup besar. Hal tersebut memperlihatkan bahwa *accu* jenis ini kurang dapat menjaga kapasitasnya dalam keadaan cukup penuh. Terlihat juga arus *inverter* dan tegangan *accu* cenderung turun seiring dengan bertambahnya waktu pemakaian. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas *accu* berkurang selama *discharge*.



Gambar 19. Variasi Tegangan Inverter untuk Lamanya Waktu *Discharge Accu*



Gambar 20. Variasi Arus Inverter untuk Lamanya Waktu *Discharge Accu*



Gambar 21. Kurva Tegangan *Accu* untuk Lamanya Waktu *Discharge Accu*

Accu berjenis *starter batteries*, umumnya tidak tahan terhadap *deep discharge*, sehingga disarankan DOD tidak lebih dari 20%. Berikut ini perhitungan lama beban dapat beroperasi dengan *accu discharge* sebesar 20%*C*. Besar arus yang diambil dari *accu* (I_{ACCU})

$$\begin{aligned} \text{diketahui: tegangan } accu, V_{ACCU} &= 12V_{DC} \\ \text{daya beban, } P_{LOAD} &= 20W \\ \text{efisiensi inverter, } \eta_{inverter} &= 95,363\% \\ I_{ACCU} &= \frac{P_{LOAD}}{\eta_{INVERTER} \times V_{ACCU}} = \frac{20}{0,95363 \times 12} = 1,747A \end{aligned}$$

Lama beban dapat beroperasi dengan *accu discharge* sebesar 100% *C*

$$\begin{aligned} \text{diketahui: kapasitas } accu, C &= 5Ah \\ \text{hour rating } accu, R &= 10 \\ \text{arus yang diambil dari } accu, I_{ACCU} &= 1,747A \\ \text{asumsi Peukert exponent, } n &= 1,4 \text{ (typical untuk } accu) \end{aligned}$$

$$T_{(discharge\ 100\%C)} = \frac{C \times \left(\frac{C}{R}\right)^{n-1}}{I_{ACCU}^n} = \frac{5 \times \left(\frac{5}{10}\right)^{1,4-1}}{1,747^{1,4}} = 1,734 \text{ jam}$$

Lama beban dapat beroperasi dengan *accu discharge* sebesar 20%*C*

$$T_{(discharge\ 20\%C)} = \frac{20}{100} \times 1,734 = 20,81 \text{ menit}$$

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa kapasitas *accu* akan berkurang sebanyak 20% bila *discharge* selama 20,81 menit.

Dari data hasil pengukuran terlihat bahwa kapasitas *accu* berkurang sebanyak 10% bila *discharge* selama 10 menit, yaitu pada menit ke-11 ($V_{ACCU} = 11,9V_{DC}$ (SOC 40%)) hingga menit ke-21 ($V_{ACCU} = 11,75V_{DC}$ (SOC 30%)). Bila *accu discharge* sebesar 20%*C*, maka lama waktu *discharge* sebesar 20 menit (2x10menit). Terlihat bahwa hasil pengukuran tidak terlalu berbeda jauh dengan hasil perhitungan, *accu discharge* 0,81 menit lebih cepat daripada hasil perhitungan. Waktu beroperasinya beban 3,89% lebih cepat daripada hasil perhitungan.

TABEL 3. PERBANDINGAN HASIL PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN DISCHARGE ACCU

	Perhitungan	Pengukuran	Error
Waktu Discharge 20%.C	20,81 menit	20 menit	$\frac{20,81 - 20}{20,81} \times 100\% = 3,89\%$

Bila *accu* terisi “penuh” (SOC 100%), maka lama pemakaian maksimum yang cukup aman untuk *accu* berjenis *starter batteries* adalah selama 20 menit, karena DOD maksimum yang disarankan untuk *starter batteries* hanya sebesar 20% dan *discharge* selama 20 menit akan menghabiskan kapasitas *accu* sebesar 20% (SOC 80%). Pemakaian *accu* melebihi DOD 20% tidak disarankan karena dapat mengakibatkan kerusakan pada elektroda *accu* yang berdampak pada semakin berkurangnya usia pemakaian *accu*.

IV.4. Lama Charge Accu

Pada bagian ini akan diukur penskalaan dari lama waktu *charge accu*. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk membandingkan lama *charge accu* secara teoritis dengan

kenyataannya dan melihat seberapa besar penyimpangan yang terjadi.

Hasil pengukuran menunjukkan ada kecenderungan bertambahnya arus *charge accu* pada awal *charging* hingga menuju nilai yang agak konstan. Hal tersebut disebabkan pada saat awal *charge*, *accu* masih dalam keadaan cukup “kosong” sehingga dapat menerima arus dengan cepat dan arus *charge* cenderung bertambah besar sesaat, setelah *accu* cukup terisi, arus *accu* akan mulai stabil hingga akhirnya cenderung semakin berkurang dengan bertambahnya kapasitas *accu*. Semakin lama waktu *charge accu*, maka tegangan *accu* pun semakin bertambah pula, hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas *accu* semakin bertambah selama *charge*.

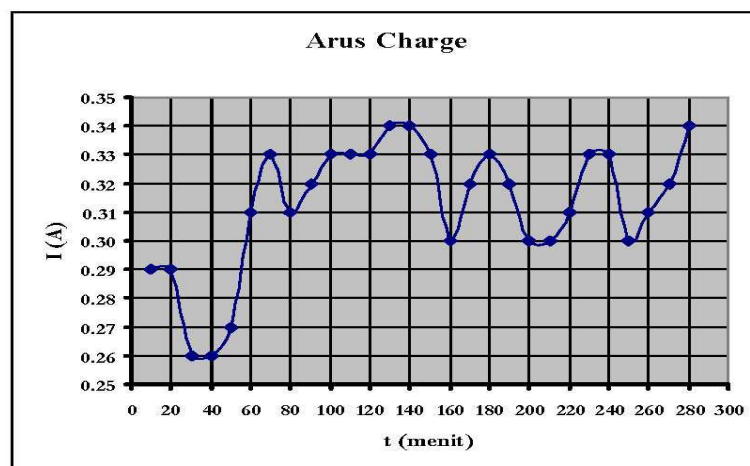
Kapasitas *accu* yang hendak di-charge sebesar 20%.C

$$20\%.C = \frac{20}{100} \times 5Ah = 1Ah$$

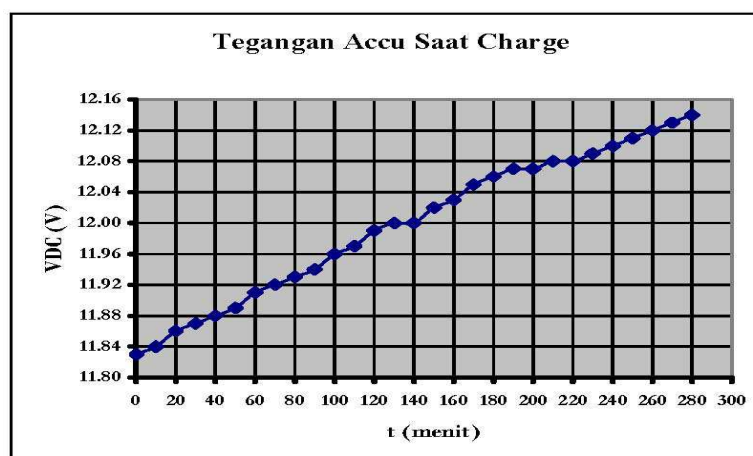
Lama waktu *charge accu* sebesar 20%.C dengan arus *charge* 0,3125A.

$$T_{Charge(20\%.C)} = \frac{20\%.C}{I_{Charging}} = \frac{1Ah}{0,3125A} = 3,2 jam$$

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa kapasitas *accu* akan bertambah sebesar 20% bila *charge* dengan arus sebesar 0,3125A selama 3,2 jam.



Gambar 22. Variasi Arus Charge untuk Lamanya Waktu Charge Accu



Gambar 23. Kurva Tegangan Accu untuk Lamanya Waktu Charge Accu

Dari hasil pengukuran terlihat bahwa untuk meningkatkan kapasitas *accu* sebesar 10% dengan arus *charge* rata-rata 0,3125A dibutuhkan waktu selama 2 jam, yaitu dari menit ke-60 ($V_{ACCU} = 11,91V_{DC}$ (SOC \approx 40%)) hingga menit ke-180 ($V_{ACCU} = 12,06V_{DC}$ (SOC 30%)). Bila *accu charge* sebesar 20%.C, maka lama waktu *charge* 4 jam (2x2 jam). Terlihat bahwa hasil pengukuran sedikit berbeda dengan hasil perhitungan, *accu charge* 0,8 jam lebih lama daripada hasil perhitungan. Waktu yang diperlukan untuk *charge accu* 25% lebih lama daripada perhitungan. Hal tersebut dikarenakan *charge regulator* yang direalisasikan tidak termasuk *charge regulator* yang “pintar” karena hanya dapat mengatur proses *charge accu* dengan cara on-off arus *charge* tanpa dapat menyesuaikan besar arus dan tegangan *charge* dengan kondisi *accu*, sehingga proses *charge* tidak selalu sesuai dengan kondisi *accu* dan akibatnya waktu *charge* menjadi lebih lama daripada hasil perhitungan.

TABEL 4 PERBANDINGAN HASIL PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN CHARGE ACCU

	Perhitungan	Pengukuran	Error
Waktu <i>charge</i> 20%.C	3,2 jam	4 jam	$\frac{4 - 3,2}{3,2} \times 100\% = 25\%$

Bila beban mulai beroperasi saat *accu* terisi “penuh” (SOC 100%), maka lama *charge accu* dengan DOD 20% dengan arus *charge* rata-rata 0,3125A adalah selama 4 jam. Proses *charge* dapat dipercepat dengan memberikan arus *charge* yang lebih besar tetapi disarankan tidak melebihi nilai *rate of discharge accu* karena dapat mengakibatkan *accu overcharge* yang berdampak pada kerusakan elektroda *accu* sehingga memperpendek usia pemakaian *accu*.

Dari peta *sun hour* (Gambar 12 dan Gambar13) dapat diketahui, pada bulan Desember daerah Bandung mempunyai 4 s/d 5 *sun hour*, sedangkan pada bulan Juni daerah Bandung mempunyai 5 s/d 6 *sun hour*. Bila perancangan didasarkan pada kondisi terburuk, yaitu 4 *sun hour* maka beban berupa pompa air 20W hanya dapat dioperasikan selama 20 menit per hari tanpa harus khawatir *accu* akan kosong (dengan asumsi arus *charge* sebesar 0,3125A). Untuk arus *charge* yang lebih besar tetapi dibawah *rate of discharge accu* ($I_{charge} < 0,5 A$), waktu *charge accu* akan semakin berkurang sehingga pengoperasian beban dapat lebih lama dari 20 menit perhari-nya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan dan pengamatan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Prototip *Solar Water Pump System* yang telah berhasil disimulasikan dapat mengoperasikan beban dengan *accu* dalam *discharge* sebesar 20%.C selama 20 menit. Untuk *recharge accu* sebesar 20%.C tersebut, dibutuhkan waktu 4 jam bila menggunakan arus sebesar 0,3125A.
- Besarnya *fix tilt angle* untuk kota Bandung adalah 15° FN.
- Bila digunakan *charge regulator* yang lebih “cerdas”, yang dapat menyesuaikan tegangan dan arus *charge* terhadap kondisi *accu*, maka proses *charge accu* bisa menjadi lebih cepat. Sebaiknya ada *discharge regulator* yang dilengkapi dengan *LVD (Low Voltage Disconnect)* yang dapat secara otomatis memproteksi *accu* dari *deep discharge* sehingga terhindar dari kerusakan dan memperpanjang usia *accu*.
- Bila digunakan *inverter* jenis *modified sine wave* atau *sine wave*, akan dihasilkan kualitas

catu daya yang lebih baik daripada *square wave*, selain itu lebih sesuai untuk berbagai macam beban dan efisiensinya lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6f.html>
- [2] W. Fay, *The handbook of photovoltaic application*, Atlanta, Georgia: Fairmont Press, Inc, 1986
- [3] A. Hilger, *Applications of photovoltaics*, Philadelphia: R. Hill, 1989
- [4] <http://www.mrsolar.com/Merchant2/merchant.mvcStoreCode=MSOS&Screen=faq16>
- [5] <http://www.mysolar.com/mysolar/pv/solarelectricity.asp>
- [6] <http://www.solarexpert.com/pvtypes.html>
- [7] <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Solar-cell>
- [8] <http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/photos/documents/29SKRIPTPhotovoltaic.pdf>
- [9] <http://www.kyocerasolar.com>
- [10] <http://www.solarb.com/elect/solarcirc/scc3/>
- [11] http://www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_ckt30.htm