Perancangan dan Produksi Modul Surya 240 Wp untuk Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) - *Independent Power Producer* (IPP) di Kupang, Nusa Tenggara Timur

Asep Sopandi¹ Rasional Sitepu² Andrew Joewono³

¹ Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

³ Program Studi Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Modul surya merupakan komponen yang utama dengan karakteristik yang baik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Modul surya dibuat dari serangkaian sel surya yang diinterkoneksi secara seri dan atau paralel untuk mendapatkan karakteristik listrik yang sesuai dengan tuntutan desain sistem PLTS yang akan dibangun. Modul surya juga dibentuk dari lembaran kaca khusus dengan kandungan besi rendah, lembaran bahan- bahan polimer, bahan logam untuk interkoneksi antar sel dan alat keluaran yang berfungsi menunjang sifat mekanik, elektrik dan ketahanan modul surya. Pembahasan cara perancangan modul surya, dijelaskan mulai dari dasar-dasar perancangan, spesifikasi modul surya yang akan dibuat, data-data sel surya dan syarat-syarat perancangan sesuai dengan standar kualitas modul surya. Sebagai contoh aplikasi modul surya yang dibuat jenis modul surya silikon polikristalin seri 240 Wp yang digunakan pada proyek pembangkit listrik tenaga surya Independent Power Producer (IPP) Kupang 5 Mwp tahun 2015. Serta diuraikan tahapan proses produksi modul surya dan penetapan parameter-parameter proses produksi sesuai dengan sifat dan jenis bahan yang ada dan proses produksi. Karakteristik listrik modul surya dengan menganalisa Daya maksimum (Pmax), Tegangan maksimum (Vmp), Arus maksimum (Imp), Tegangan rangkaian terbuka (Voc), Arus hubung singkat (Isc), efisiensi dan *Fill factor* dengan menggunakan peralatan sun simulator.

Kata kunci : Modul Surya, Sel Surya, Polikristalin.

Diajukan: 24 April 2021

Direvisi: 18 Mei 2021

Diterima: 20 Mei 2021

Dipublikasikan online: 25 Mei 2021

Pendahuluan

Salah satu sumber energi yang menjadi andalan dalam memenuhi target bauran energi baru terbarukan (EBT) yang dicanangkan pemerintah sebesar 23 % pada tahun 2025 adalah sumber energi dari matahari, berupa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Banyak keunggulan yang dimiliki PLTS dibanding dengan sumber EBT yang lain diantaranya potensi radiasi matahari yang tersebar merata di seluruh wilayah Indonesia, kemudahan pembangunan dan pemasangan, teknologi yang sudah cukup berkembang dan terbukti. Kelemahan PLTS terutama sumber energi matahari, sangat dipengaruhi oleh faktor cuaca harian dan sumber energi matahari tidak tersedia di malam hari.

Dilihat dari koneksi ke jaringan grid PLN, maka PLTS di klasifikasikan menjadi PLTS On-Grid dan PLTS Off-Grid. PLTS On-Grid adalah PLTS yang energi keluarannya langsung diinjeksikan ke jaringan PLN, sedangkan PLTS Off-Grid adalah PLTS yang keluarannya langsung digunakan, tanpa melibatkan jaringan PLN dan menggunakan baterai sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan dari konversi PLTS nya. (Sitepu & Gunadhi, 2014)

Dilihat dari penerapannya, dikenal dengan sistem PLTS murni dan PLTS *Hybrid*. PLTS *Hybrid* adalah PLTS yang digabungkan dengan sumber energi lainnya, baik dengan sumber EBT lainnya misalkan energi angin ataupun sumber energi non-EBT seperti Diesel.

Struktur komponen PLTS secara umum terdiri dari alat pencatu daya berupa modul surya (panel surya), inverter, *combiner box*, panel proteksi , *Battery Charge Regulator* dan battery. Seperti pada Gambar 1. dan Gambar 2.,

Pada bagian ini, dijelaskan cara merancang modul surya untuk PLTS dan cara memproduksi dari tahapan fabrikasi modul surya, penentuan parameter kualitas modul surya dan pengukuran karakteristik modul surya yang diproduksi. Perancangan dan produksi akan diaplikasikan pada proyek PLTS 5 MWp IPP di Kupang, Nusa Tenggara Timur, menggunakan modul surya silikon polikristalin seri 240 Wp. (PLN, 2015)

Metode

Perancangan modul surya pada umumnya merupakan interkoneksi dan enkapsulasi menjadi sel surya, untuk dapat menghasilkan tegangan, arus dan daya yang cukup besar

Cara mensitasi artikel ini:

Sopandi, A., Sitepu, R., Joewono, A. (2021) Perancangan dan Produksi Modul Surya 240 Wp untuk Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) - Independent Power Producer (IPP) di Kupang, Nusa Tenggara Timur. *Buletin Profesi Insinyur* 4(1) 029-037

Gambar 1. Komponen PLTS On-Grid

Gambar 2. Komponen PLTS OFF-Grid DC dan AC Coupling

untuk digunakan dalam implementasinya. Karakteristik listrik modul surya umumnya ditunjukkan oleh kurva Arus-Tegangan (I-V) yang sangat ditentukan oleh karakteristik listrik solar selnya. Idealnya, bila solar sel mempunyai karakteristik yang hampir sama atau identik, maka karakteristik kurva I-V modul surya akan mempunyai karakteristik yang sama dengan skala nilai yang lebih besar. Namun dalam praktek skala produksi, solar sel tidak pernah memiliki bentuk kurva I-V yang sama persis (Green, 2009).

Dalam hal ini maka karakteristik modul surya akan ditentukan atau dibatasi oleh solar sel dengan kualitas dan keluaran yang paling rendah. Selain dirancang untuk memiliki karakteristik listrik yang handal dan sesuai dengan kebutuhan sistem PLTS, modul surya juga dirancang untuk memiliki sifat mekanis yang kuat, tahan terhadap gangguan atau tekanan cuaca dan iklim pada saat penggunaannya. Oleh karena itu, dalam perancangan modul surya juga perlu dipertimbangkan pemilihan bahan material pendukungnya, seperti kaca, polimer, bahan interkoneksi antar solar sel, kerangka, perangkat keluaran berupa *Junction-Box* termasuk bahan adhesifnya.

Karakteristik Listrik Solar Sel dan Modul Surya (S.R., M.A., & M.E., 1998)

Solar sel silikon pada dasarnya adalah sebuah dioda yang dibentuk dari silikon tipe N (didoping oleh atom Fosfor) dan

silikon tipe P (didoping oleh atom Boron). Karakteristik listrik solar sel dan modul surya diilustrasikan pada Persamaan (1). Ketika partikel foton dari sinar matahari mengenai solar sel, maka akan membentuk pasangan elektron (-) dan hole (+). Medan listrik yang terbentuk pada *PN-Junction* dalam solar sel akan menyapu elektron ke arah lapisan N dan hole ke arah lapisan P, sehingga menghasilkan aliran elektron atau arus listrik. Persamaan (1) karakteristik dioda tanpa penyinaran adalah :

$$I = I_o (\text{Exp}^{qV/KT} - 1) \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

I = Arus yang mengalir pada *PN-Junction* (solar sel), akibat adanya beda polaritas

I_o = "Dark Saturation Current", yaitu rapat arus bocor dioda ketika tidak ada cahaya

Q = Muatan listrik

K = Tetapan Boltzman

T = Temperatur mutlak Kelvin

I_o akan naik nilainya, bila temperatur nilainya naik, dan akan turun nilainya, bila kualitas *PN- Junction* semakin baik.

Bila terjadi penyinaran, maka akan terbentuk tegangan listrik dalam solar sel, akibat terbentuknya perpindahan pasangan elektron-hole, sesuai dengan persamaan (2) :

$$I = I_{ph} - I_o (\text{Exp}^{qV/KT} - 1) \dots\dots\dots(2)$$

I_{ph} = Arus yang timbul akibat penyinaran.

Persamaan tersebut dapat digambarkan sebagai kurva I-V, seperti pada Gambar 3.

Pada Gambar 3, terlihat beberapa parameter yang menggambarkan karakteristik listrik solar sel dan modul surya antara lain : Daya maksimum (P_{mp}), Tegangan terbuka V_{oc} , Arus hubung singkat I_{sc} , Tegangan pada daya maksimum V_{mp} , dan arus pada daya maksimum I_{mp} .

Tahapan Perancangan Pembuatan Modul Surya

Perancangan modul surya umum dilakukan untuk menghasilkan dokumen rancangan, spesifikasi peralatan, tahap *prototyping* dan pengukuran-pengetesan hasil produk, dengan tahap sebagai berikut :

1. Pemilihan dan penentuan jenis solar sel
2. Pencarian data solar sel terkini
3. Pemilihan solar sel
4. Perancangan karakteristik listrik modul surya
5. Perancangan mekanik dan dimensi fisik modul surya
6. Pembuatan gambar fisik modul surya
7. Penentuan spesifikasi bahan-bahan atau komponen pendukung
8. Penentuan parameter-parameter proses produksi untuk pembuatan *prototyping*
9. Pengukuran karakteristik listrik modul surya hasil produksi

Gambar 3. Kurva Arus- Tegangan (I-V) dari solar sel ataupun modul surya.

Hasil Kerja

Perancangan Modul Surya Polikristalin seri 240 Wp

1. Pemilihan dan Penentuan Jenis Solar Sel
Pemilihan dan penentuan jenis solar sel berdasarkan pada pertimbangan nilai efisiensi solar sel, yang akan menentukan besar daya yang dihasilkan tiap selnya serta pertimbangan harga. Secara umum solar sel jenis monokristalin mempunyai capaian daya maksimum tiap sel lebih tinggi dibanding polikristalin namun harga juga relatif lebih tinggi. sebagai pertimbangan dalam perancangan apabila perhitungan parameter dapat disediakan oleh solar sel jenis polikristalin, maka dipilih solar sel jenis polikristalin, kecuali ada pertimbangan lain, misalnya kebutuhan efisiensi sel yang tinggi dengan luasan lahan yang terbatas. Untuk perancangan proyek ini diputuskan menggunakan solar sel jenis polikristalin untuk modul surya seri 240 Wp.

2. Pencarian Data Solar Sel Terkini

Pencarian data solar sel dilakukan untuk mengetahui perkembangan terkini dari solar sel yang diproduksi di dunia. Perkembangan tersebut dapat berupa perkembangan penggunaan material baru, proses fabrikasi terbaru, modifikasi struktur dan susunan material maupun perkembangan efisiensi yang dicapai oleh solar sel jenis tertentu. Data yang paling penting dan relevan untuk proses perancangan adalah perkembangan capaian efisiensi solar sel untuk jenis yang akan dipakai. Proses pencarian dilakukan dengan meminta data dari pabrikan.

Data Solar Sel untuk Modul Surya jenis Polikristalin seri 240 Wp

Modul surya seri 240 Wp ini digunakan pada proyek Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) IPP Kupang kapasitas 5 MWp dibangun pada tahun 2015. Data solar sel dari perusahaan "Jetion Solar China Co.,Ltd", seperti pada Tabel 1–4.

Tabel 1. Mechanical Data and Design

Format	156 mm x 156 mm +/- 0,5 mm
Thickness	210 mikron +40 mikron
Front(-)	1,4 mm bus bars(silver), blue anti-reflection coating (silicon nitride)
Back (+)	2,4 mm wide soldering pads (silver)back surface field (aluminum)

Tabel 2. Temperature Coefficient Of Sels

V_{oc} . Temp. Coef. %/K	-0,351 %/K
I_{sc} . Temp. Coef. %/K	+0,035 %/K
P_m . Temp. Coef. %/K	-0,47 %/K

3. Pemilihan Solar Sel setelah tahap produksi

Hasil produksi solar sel umumnya tidak menghasilkan kualitas solar sel dalam satu kelas dari nilai karakteristik listrik tertentu. Hasil produksi mengikuti pola distribusi normal, yaitu solar sel dengan kualitas karakteristik menengah akan dihasilkan lebih banyak jumlahnya, sedangkan solar sel dengan kualitas karakteristik rendah dan tinggi jumlahnya sedikit.

Tabel 3. Electrical Characteristic

Class	Eff(%)	P_{mp} (W)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
182	18,2	4,43	0,536	8,263	0,643	8,712
180	18,0	4,38	0,535	8,188	0,633	8,701
178	17,8	4,33	0,534	8,112	0,632	8,652
176	17,6	4,28	0,533	8,036	0,631	8,641
174	17,4	4,23	0,529	8,005	0,630	8,591
172	17,2	4,19	0,525	7,973	0,627	8,542
170	17,0	4,14	0,522	7,926	0,634	8,495
168	16,8	4,09	0,518	7,893	0,620	8,452
166	16,6	4,04	0,515	7,844	0,617	8,410
164	16,4	3,99	0,514	7,765	0,616	8,373
162	16,2	3,94	0,511	7,715	0,615	8,317
160	16,0	3,89	0,509	7,650	0,613	8,251
158	15,8	3,85	0,502	7,660	0,610	8,121
154	15,4	3,75	0,501	7,481	0,608	8,023
150	15,0	3,65	0,499	7,315	0,604	7,833

Data under STC (Standard Testing Condition) 1000W/m², AM 1.5, 25°C

4. Perancangan Karakteristik Listrik Modul Surya Polikristalin seri 240 Wp

Perancangan karakteristik listrik modul surya dilakukan, meliputi perhitungan jumlah solar sel dan konfigurasi

interkoneksinya untuk mencapai nilai-nilai karakteristik listrik yang diinginkan (seri atau paralel), tegangan, arus, daya, efisiensi, sesuai dengan parameter sistem PLTS yang dirancang.

Tabel 4. Intensity Dependence

Intensity (W/m ²)	I _{sc} x(mA)	V _{oc} x(mV)
1000	1,00	1,000
900	0,90	0,989
500	0,50	0,963
300	0,30	0,939
200	0,20	0,920

Berdasarkan data solar sel dari Tabel 3., maka untuk pembangunan PLTS IPP Kupang diputuskan menggunakan solar sel dengan efisiensi = 17,4 %, Daya persel (P) = 4,23 W, Tegangan pada titik daya maksimum mpp (V_{mp}) = 0,529 V, Arus pada daya maksimum (I_{mp}) = 8,005 A, Tegangan terbuka (V_{oc}) = 0,630 V dan arus hubung singkat (I_{sc}) = 8,591 A.

Berdasarkan pertimbangan berat, modul surya yang akan dikirim ke lokasi, kemudahan instalasi di lapangan dan untuk kemudahan mobilisasi maka diputuskan membuat modul dengan jumlah solar sel 60 buah/ keping per modul. Dari data solar sel yang telah dipilih, maka karakteristik modul surya yang dibuat akan memiliki karakteristik listrik sebagai berikut :

a. Daya modul surya (Luque & Hegedus, 2011)

Solar sel sebanyak 60 buah dikoneksikan secara seri, maka didapat :

$$\begin{aligned} \text{Daya modul surya (P)} &= \text{Jumlah solar sel} \times \text{Daya persel} \dots(3) \\ &= 60 \times 4,23 \text{ watt} \\ &= 253,8 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Karena adanya kehilangan Ohmic (*Ohmic losses*), terutama pada bahan *tabbing* (bahan tembaga berbentuk foil yang menghubungkan solar sel yang satu dengan yang lain dengan proses solder), kehilangan optik dan pengaruh ketidakseragaman karakteristik solar sel, maka daya akan berkurang sebesar 3% sd 4% (Luque & Hegedus, 2011), sehingga daya modul surya menjadi = 253,8 x 0,96 = 243,65 Watt.

b. Tegangan V_{mp} Modul Surya

Tegangan V_{mp} modul surya adalah tegangan modul surya pada titik daya maksimum. Dengan 60 buah solar sel dikoneksi secara seri, maka tegangan V_{mp} modul adalah :

$$\begin{aligned} V_{mp} \text{ modul} &= 60 \times V_{mp} \text{ Sel} \dots\dots\dots(4) \\ &= 60 \times 0,529 \\ &= 31,74 \text{ Volt} \end{aligned}$$

c. Arus I_{mp} Modul Surya

Arus I_{mp} modul surya adalah kuat arus modul surya pada titik daya maksimum. Dengan 60 buah solar sel dikoneksi secara seri, maka nilai kuat arus modul surya :

$$I_{mp} \text{ modul surya} = I_{mp} \text{ solar sel} = 8,005 \text{ A} \dots\dots\dots(5)$$

d. Tegangan Terbuka V_{oc} Modul Surya

Seperti halnya dengan tegangan pada titik daya maksimum, tegangan terbuka V_{oc} modul surya adalah perkalian jumlah sel dengan nilai tegangan V_{oc} solar selnya.

$$\begin{aligned} V_{oc} \text{ modul surya} &= \text{Jumlah sel} \times V_{oc} \text{ sel} \dots\dots\dots(6) \\ &= 60 \times 0,630 \end{aligned}$$

$$= 37,8 \text{ Volt}$$

e. Arus Hubung singkat I_{sc} Modul Surya

Seperti halnya arus pada titik daya maksimum, maka arus hubung singkat modul surya :

$$\text{Arus hubung singkat } I_{sc} \text{ modul surya} = \text{Arus hubung singkat solar selnya} = 8,591 \text{ A} \dots\dots\dots(7)$$

f. Efisiensi Solar sel dan Modul surya (IEC 61215-1-1 :2016 Terrestrial Photovoltaic (PV) module, 2016)

Perhitungan efisiensi solar sel maupun modul surya diuraikan sebagai berikut :

- Nilai *Irradian* sinar matahari ketika sampai ke bumi adalah 1000 Watt/m²
- Bila solar sel atau modul surya memiliki efisiensi 100%, maka dengan solar sel atau modul surya yang memiliki luas 1 m² akan menghasilkan daya 1000 Watt.
- Dari Tabel 1. dapat dilakukan perhitungan luasan 1 buah solar sel adalah 156 x 156 mm = 24336 mm² = 0,0243 m².
- Bila solar sel memiliki efisiensi 100 %, maka dengan luasan 0,0243 m² akan dihasilkan daya = 0,0243 x 1000 = 24,3 W.
- Solar sel yang digunakan untuk membuat modul surya 240 Wp, menghasilkan daya 4,04 W untuk luasan 0,0243m².

Jadi,

$$\begin{aligned} \text{efisiensi} &= (\text{Daya Sel}) \times 1000 / (L \times W) \dots\dots\dots(8) \\ &= 4,23 \times 1000 / 24336 \\ &= 0,1738 \text{ atau } 17,38 \% \end{aligned}$$

$$\text{Efisiensi modul surya} = (\text{Daya yang dihasilkan}) \times 1000 / (\text{Luas modul surya}) \dots\dots\dots(9)$$

$$\begin{aligned} &= 243,65 \times 1000 / (1607180) \\ &= 15,16 \% \end{aligned}$$

Hasil perancangan karakteristik listrik modul surya seri 240 Wp disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan Karakteristik Listrik Modul Surya Polikristalin 240 Wp

No	Parameter	Solar sel	Perhitungan	Modul surya
1	Daya P (W)	4,23	60x (4,23)x 0.96	243,65
2	Tegangan V _{mp} (V)	0,52	60x (0,529)	31,74
3	Arus I _{mp} (A)	8,005	I _{mp} sel = I _{mp} modul	8,005
4	Tegangan terbuka V _{oc} (V)	0,630	60x(0,630)	37,8
5	Arus hubung singkat I _{sc} (A)	8,591	I _{sc} sel = I _{sc} modul	8,591
6	Efisiensi (%)	17,4	243,65/(1607,2)	15,16

Perancangan Mekanik dan Dimensi Fisik Modul Surya Polikristalin Seri 240 Wp

Perancangan mekanik dan dimensi fisik modul surya meliputi penetapan jumlah baris dan kolom solar sel dalam modul surya, penetapan jarak antar solar sel serta jarak antara solar sel dengan tepi modul surya. Jarak antara solar sel mengikuti standard IEC atau SNI-IEC 61730-1, khususnya mengenai jarak rambat (*Creepage Distance*) dan Jarak ruang (*Clearance Distance*). (Luque & Hegedus, 2011) (IEC 61730-1: 2008 Photovoltaic (PV) module safety qualification, 2008)

Solar sel pada modul surya disusun dalam tata letak berupa baris dan kolom. Jumlah kolom diambil genap mulai

dari 2, 4, 6, sedangkan jumlah baris tidak dibatasi. Kerentanan kaca (pecah) ketika modul surya mempunyai ukuran fisik terlalu besar, sebagai pertimbangan dalam menentukan jumlah sel dalam modul surya serta berat fisiknya. Berat modul surya perlu menjadi bahan pertimbangan ketika letak lokasi pemasangan jauh di daerah terpencil dan keterbatasan alat angkut. Modul yang terlalu berat dapat menyulitkan proses instalasi.

Perancangan mekanik dan fisik modul surya seri 240 Wp adalah sebagai berikut :

- Dari Tabel 1. diketahui dimensi solar sel adalah 156 mm x 156 mm
- Untuk membuat modul pada kisaran 240 Wp, diperlukan solar sel 60 buah dengan konfigurasi 6 kolom dan 10 baris.
- Penentuan Panjang Kaca modul surya adalah : (IEC 61730-1: 2008 Photovoltaic (PV) module safety qualification, 2008)

$$L_{ms} = (10 \times L_{sc}) + (9 \times \text{jarak antar sel vertikal}) + (2 \times \text{Jarak solar sel ke tepi modul atas dan bawah}) \dots\dots(10)$$

$$\begin{aligned} L_{ms} &= (10 \times 156) + (9 \times 2) + (2 \times 26) \\ &= 1560 + 18 + 52 \\ &= 1630 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_{frame} = 1630 + 6 = 1636 \text{ mm}$$

dimana :

L_{ms} = Panjang Kaca modul surya

L_{sc} = Panjang solar sel

L_{frame} = Panjang frame Aluminium

- Penentuan lebar Kaca Modul Surya adalah : (IEC 61730-1: 2008 Photovoltaic (PV) module safety qualification, 2008)

$$W_{ms} = (6 \times W_{sc}) + (5 \times \text{Jarak antar sel horizontal}) + (2 \times \text{Jarak solar sel ke tepi modul kiri dan kanan}) \dots\dots(11)$$

$$\begin{aligned} W_{ms} &= (6 \times 156) + (5 \times 3) + (2 \times 17,5) \\ &= 936 + 15 + 35 \\ &= 986 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$W_{frame} = 986 + 6 = 992 \text{ mm}$$

dimana :

W_{ms} = Lebar Kaca modul surya

W_{sc} = Lebar solar sel

W_{frame} = Lebar frame Aluminium.

Konstruksi Modul surya seri 240 Wp, seperti terlihat pada Gambar 4 dan 5. Gambar skematik mekanik modul surya seri 240 Wp disajikan pada Gambar 4 dan gambar fisik modul disajikan pada Gambar 5.

Penentuan Spesifikasi Bahan-Bahan Pendukung

Komponen pembuatan modul surya terdiri dari : *String* dan *busbar ribbon*, kaca, bahan polimer untuk enkapsulasi dan *back-sheet*, *frame* (bingkai berbahan antikorosi), *junction-box*, bahan adhesif, *sealant* dan bahan packagingnya.

Struktur komponen pembuatan modul surya terlihat pada Gambar 6.

Fungsi dari komponen dijelaskan sebagai berikut :

- a. *String* dan *Busbar ribbon*

String ribbon berfungsi sebagai koneksi elektrik antara solar sel dengan proses penyolderan (alat solder manual atau *mesin stringer*). *Busbar ribbon* berfungsi sebagai koneksi elektrik antar rangkaian solar sel (*array*). *String ribbon* dan *bus ribbon* terbuat dari lembar tembaga yang dilapisi timah.

Spesifikasi,

- Bahan : Tin- Coated Copper Ribbon
- Dimensi : String Ribbon 0.23*1.5 mm
- Bus Ribbon : 0.35*5.0 mm
- Standard : 2011/65/EU, ISO 17075:2007, EN62321 :2009
- Pabrik : Suzhou Yubang New material Co. Ltd.

Gambar 4. Skematik Mekanik Modul Surya seri 240 Wp

Gambar 5. Tampak Depan dan Belakang Modul surya seri 240 Wp

Gambar 6. Struktur komponen pembuatan modul surya

b. Bahan Enkapsulasi Etilen Vinil Asetat (EVA)

Bahan enkapsulasi digunakan agar modul surya tahan terhadap penetrasi uap air, gas dan cairan, ketika digunakan di lapangan dalam jangka waktu 20 sampai 25 tahun (S.R., M.A., & M.E., 1998). Bahan enkapsulasi juga harus tahan mengalami beda potensial minimal sama dengan tegangan sistem PLTS. Bahan yang digunakan adalah *kopolimer Etilen vinil asetat*, sejenis plastik yang terdiri dari rangka atom karbon yang panjang. EVA bersifat termoplastik, bahan ini akan berubah bentuk secara reversibel ketika dipanaskan. Kedalam EVA umumnya ditambahkan "*curing agent*" dan stabiliser UV. (Luque & Hegedus, 2011)

Spesifikasi,

- Bahan : Etilen Vinil Asetat (EVA)
- Ketebalan : 0.45 – 0.5 mm
- Temperatur laminating : 140 – 150°C
- Waktu Vacum : 4 – 6 menit
- Waktu Tekan : 10 – 14 menit
- Pabrik : Hangzhou First PV Material Co. Ltd

c. *Back-sheet*

Back-sheet merupakan bahan polimer pada lapisan belakang modul surya. Bahan ini berfungsi sebagai penghalang dari kelembaban dan proses korosi, serta sebagai isolasi elektrik untuk keamanan penggunaan modul surya. *Back-sheet* terdiri dari 3 lapis bahan, yaitu lapisan luar adalah *tedlar*, polimer *fluoro* buatan "Dupont" yang tahan terhadap penetrasi uap dan bahan cairan dari luar, tetapi tidak memiliki tahanan isolasi listrik untuk tegangan tinggi, sehingga dibuat lapisan kedua yaitu *poliester*, serta Lapisan ketiga adalah *tedlar*. Spesifikasi,

- Struktur bahan pelapis : lapisan luar Tedlar 25 mikron, lapisan tengah Poliester-tedlar 300 mikron dan lapisan polietilen 25 mikron
- Standard : IEC 60664-1:2007 dan IEC 61730-2: 2004
- Pabrik : Jiangsu Worldsun PV Technology Co. Ltd.

d. Kaca

Lembaran kaca untuk memberikan rigiditas mekanis dan perlindungan terhadap modul surya. Kaca harus dalam bentuk *tempered* dan harus mempunyai kandungan ion besi rendah agar transmisi cahaya sebesar mungkin. (Luque & Hegedus, 2011)

Spesifikasi,

- Ketebalan : 3,2 mm
- Kandungan besi : 0,012%
- Jenis : Tempered
- Pabrik : Hejiang Jiaju Glass Co. Ltd

e. Junction-Box (J-Box)

Perangkat ini berfungsi sebagai tempat terminal keluaran listrik dari modul surya.

Spesifikasi,

- Type : PV GZX 156 K
- Konektor : MC4
- Rating Tegangan : 1000 VDC
- Rating Arus : 12 A
- Dioda : 16 A/40V
- Tingkat Proteksi : IP 67
- Ukuran kabel : 4,0 mm
- Kelas nyala : UL94V-0
- Pabrik : Ningbo GZX PV

f. Frame atau rangka

Frame berfungsi sebagai penambah kekuatan mekanis modul surya dan sebagai sarana untuk pemasangan modul surya pada tiang penyangga di lapangan.

Spesifikasi,

- Aluminum ekstrusi
- Anodized plating

g. Bahan sealant

Sealant adalah bahan polimer yang digunakan sebagai bahan kedap air dan udara yang diletakkan pada celah antara frame dan kaca, serta bahan pengecoran terminal pada J-Box.

Spesifikasi,

- Bahan : Dimetil siloksan
- Type : Tonsan 1527
- Pabrik : Tonsan

Proses Produksi dan Penentuan Parameter- Parameternya

Tahapan proses produksi modul surya sebagai berikut : (Ismet, Sopandi, & Sofyan, 1999)

1. *Incoming Inspection*, pada tahap ini dilakukan pemeriksaan kualitas dari komponen terutama solar sel
2. *Soldering Tab dan string*, pada tahap ini *string ribbon* disolder pada bagian atas solar sel, untuk membentuk rangkaian solar sel yang terhubung seri
3. *Lay-up*, pada tahap ini seluruh bahan komponen modul surya disusun secara berurutan dari atas ke bawah dengan urutan : Kaca, EVA, Solar Sel yang sudah dirangkai, EVA dan *Back-sheet*. Setiap *string* juga diinterkoneksi secara seri dengan penyolderan *busbar ribbon*
4. *Inspeksi EL-1*, pada tahap ini bahan yang sudah disusun diinspeksi dengan sinar infra merah menggunakan alat EL untuk melihat adanya solar sel yang retak dan solder yang lepas. (Azwar, 2010)
5. *Laminasi*, pada tahap ini, seluruh bahan yang sudah disusun pada tahap lay-up dipanaskan, divakum dan di-press dalam mesin laminasi. Pada tahap ini lapisan EVA

meleleh dan merekatkan seluruh bahan modul surya. Temperatur laminasi : 144°C dan tekanan 39-40 bar.

6. *Inspeksi EL-2*, proses ini sama dengan tahap 4, untuk melihat *micro-crack*, adanya gelembung uap air dalam modul, sisa solder dan kesalahan lain setelah proses laminasi. (Dupont, 2019)
7. *Pemasangan J-box dan Terminating*, pada tahap ini dipasang komponen J-box yang berfungsi sebagai alat keluaran listrik dari modul surya
8. *Flash Test Sun Simulator*, pada tahap ini modul surya di tes dengan penyinaran pada kondisi standar yaitu Irradians 1000 Watt/m² dan temperatur 25°C. Sehingga didapatkan data karakteristik listrik modul surya, antara lain : Daya (P_{max}), tegangan maksimum (V_{mp}), Arus maksimum (I_{mp}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), Arus hubung singkat (I_{sc}), Efisiensi dan *fill factor*
9. *Framming*, pada tahap ini *frame* dipasangkan pada modul surya
10. *Test Hi-pot dan continuity*, pada tahap ini modul surya di tes pada tegangan tinggi dan dilakukan juga uji kontinuitas *grounding*.
11. *Final inspection*, pada tahap ini dilakukan pemeriksaan visual dan penempelan tanda lolos *Quality Control* (QC)
12. *Packing*, pada tahap ini modul surya dipacking dan siap masuk gudang.

Pengukuran Karakteristik Listrik Modul Surya Hasil Prototyping. (Faradilla, 2017)

Pengukuran karakteristik modul surya dilakukan menggunakan metode pengujian indoor, dengan fasilitas pengujian "SPIRE" sebagai *Sun Simulator* "SPIRE", yang akan menghasilkan pembacaan parameter pengukuran pada kurva I-V, terlihat pada Gambar 7– 9.

Pengukuran dilakukan sebanyak 5 sampel, untuk mengetahui parameter nilai terukur I_{mp} dan I_{sc} , untuk dapat diketahui nilai efisiensi dari modul surya yang dirancang dan diproduksi.

Dari hasil pengukuran dengan menggunakan *sun simulator* yang ditampilkan pada Gambar 7–11, didapatkan nilai parameter dari sampel terukur, nilai I_{mp} berkisar antara 8,239 A hingga 8,349 A dan nilai I_{sc} berkisar antara 8,613 A hingga 8,682 A. Nilai terukur ini akan dijadikan nilai parameter hasil produksi pembuatan modul surya (panel surya tersebut).

Kesimpulan

Modul polikristalin seri 240 Wp dengan daya rancangan 243,65 Wp dan efisiensi 15,16 % menghasilkan modul surya hasil produksi, dengan daya rata-rata sebesar 249,77 Wp dan efisiensi 15,39 %. Terjadi kenaikan 2,5 % dari perhitungan rancangan. Hal ini dikarenakan arus baik I_{mp} maupun I_{sc} hasil pengukuran Sun simulator lebih besar dari pada data sheet yang ada dari pabrikan solar sel. Penyebabnya kemungkinan besar karena kondisi temperatur pada saat pengukuran terjadi penyimpangan dari keadaan standar yaitu 25°C. Secara teori, kenaikan temperatur dapat meningkatkan Arus I_{sc} dan I_{mp} (sesuai Tabel 2 dan Tabel 6 tentang *temperature coefficient* dari solar sel). Dengan demikian produksi modul surya yang akan digunakan dalam pembangunan PLTS IPP 5MWp di Kupang dapat digunakan.

Gambar 7. Hasil Pengukuran Kurva I-V dan karakteristik listrik Modul Surya 240 Wp (sampel-1)

Gambar 8. Hasil Pengukuran Kurva I-V dan karakteristik listrik Modul Surya 240 Wp (sampel-2)

Gambar 9. Hasil Pengukuran Kurva I-V dan karakteristik listrik Modul Surya 240 Wp (sampel-3)

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Chairul Rizal, ST., staf produksi modul surya PT Len Industri (Persero), yang mendukung data hasil pengukuran Sun simulator tahun 2015 dan 2017.
2. Harry Leo kharisma, ST., Staf Rekayasa proses produksi PT Len Industri (Persero) yang mendukung data pengukuran.

Referensi

- Azwar. (2010). Stabilitas Mekanik Material Multikristal Silicon Wafer pada Pembuatan Sel Surya (Solar Cells). *Jurnal POLIMESIN*, Volume 12 Nomor 12, Pebruari 2010, ISSN 1693-5463.
- Dupont. (2019). *Dupont: "Panduan untuk memahami cacat panel surya: dari fabrikasi hingga modul yang"*

Gambar 10. Hasil Pengukuran Kurva I-V dan karakteristik listrik Modul Surya 240 Wp (sampel-4)

Gambar 11. Hasil Pengukuran Kurva I-V dan karakteristik listrik Modul Surya 240 Wp (sampel-5)

- dipasang",. Retrieved April 2021, from www.dupont.com
- Faradilla, A. (2017, April 4). *Pengujian PV dan Pendukungnya*. Retrieved April 2021, from <http://smg.b2tke.bppt.go.id/index.php/2017/04/04/pengujian-pv-dan-pendukungnya/>
- Green, M. (2009). *Solar Cells Operating Principles. Technology and System Applications*. New South Wales: ARC Centre of Excellence in Advanced Silicon Photovoltaics & Photonics, Faculty of Engineering, UNSW.
- IEC 61215-1-1 :2016 Terrestrial Photovoltaic (PV) module. (2016). *Design qualification and type approval part-1-1 : Special requirement for testing of crystalline silicon Photovoltaic (PV) module, MQT 03 Insulation Test*.
- IEC 61730-1: 2008 Photovoltaic (PV) module safety qualification. (2008). *part-1: Requirement for Construction* . Annex B (Normative) Insulation Coordination.
- Ismet, I., Sopandi, A., & Sofyan, H. (1999). Fabrikasi Modul Surya & Peluang Bisnis. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan'99* , 29-31.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering 2nd Edition*. New Jersey: A John Wiley and Sons, Publication.
- PLN, S. P. (2015, Januari 9). <https://ebtke.esdm.go.id/post/2015/01/09/754/pln.len.teken.ppa.plts.kupang>. Retrieved April 2021, from <https://ebtke.esdm.go.id/post/2015/01/09/754/pln.len.teken.ppa.plts.kupang>
- S.R., W., M.A., G., & M.E., W. (1998). *Applied Photovoltaic*. Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems Australia.
- Sitepu, R., & Gunadhi, A. (2014). Kajian Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Atap Gedung Kota Surabaya: Studi Kasus Gedung Perkuliahan. *The 3rd National Conference on Industrial Electrical and Electronics (NCIEE) Proceedings* (pp. 150-154). Jakarta: Universitas Mercubuana.