

STUDI POTENSI LAHAN DAN AREA PERUMAHAN UNTUK IMPLEMENTASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) DI WILAYAH SERANG DAN CILEGON BANTEN

Suhendar¹, Budi Raharjo², Alimuddin³, Hady Sutjipto⁴

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

⁴Jurusan Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
e-mail: suhendar@untirta.ac.id, budiraharjo@gmail.com, alimuddin@yahoo.com, hady.sutjipto@gmail.com

ABSTRACT

Electrical energy requirements increase as population growth and technological development. Increased triggered also by the rate of energy demand growth of 6.86% annually. Energy needs largely derived from non-renewable energy which has its limitations and is not environmentally friendly. Therefore we need a renewable energy alternative and environmentally friendly. One such alternative is the use of solar energy as a power plant that was converted by solar panels. To do with it, this study aims to determine the potential for, contributions and aspects of the cost of solar energy as a power plant in a residential neighborhood Serang Cilegon. The results showed that the development and implementation of SPP in an open area can generate a total capacity 84971.481 kWp. The greatest potential in the residential Highland Park with a capacity of 50370.802 kWp that have an energy conversion amounted to 36,707,706 kWh / year. While the supply of energy 33750047 kWh / year will be able to contribute to meet all the needs of the household burden. While in Pondok Cilegon Indah residential area with a capacity of 123.032 kWp with a conversion of energy 98387 kWh / year. Energy supply 90 452 kWh / year to contribute 0.76% of the burden of households. PLTS investment with life project for 25 years for a return on investment costs takes as long as 25 years and 1 month as of the beginning of the project so as not feasible investment.

Keywords : Banten, Cilegon, Hydroelectric, Potential, Serang, Solar Energy, Solar Panels,

INTISARI

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan teknologi. Peningkatan dipicu juga oleh laju pertumbuhan kebutuhan energi 6,86% setiap tahunnya. Kebutuhan energi sebagian besar berasal dari energi tak terbarukan yang memiliki keterbatasan dan tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu diperlukan alternatif energi terbarukan dan ramah lingkungan. Salah satu alternatif tersebut adalah pemanfaatan energi matahari sebagai pembangkit listrik yang dikonversi dengan panel surya. Kaitannya dengan itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi, kontribusi dan aspek biaya energi matahari sebagai pembangkit listrik di kawasan perumahan Serang Cilegon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengembangan dan implementasi PLTS di area terbuka dapat membangkitkan kapasitas total 84971,481 kWp. Potensi terbesar pada perumahan Highland Park dengan kapasitas sebesar 50370,802 kWp yang memiliki energi konversi sebesar 36707706 kWh per tahun. Sedangkan energi suplai 33750047 kWh pertahun akan mampu berkontribusi memenuhi seluruh kebutuhan beban rumah tangga. Sementara di wilayah perumahan Pondok Cilegon Indah dengan kapasitas sebesar 123,032 kWp dengan energi konversi 98387 kWh per tahun. Energi suplai 90452 kWh per tahun mampu memberikan kontribusi 0,76% terhadap beban rumah tangga. Investasi PLTS dengan *project life* selama 25 tahun untuk pengembalian biaya investasi membutuhkan waktu selama 25 tahun 1 bulan terhitung awal berdirinya proyek sehingga tidak layak secara investasi.

Kata kunci : Potensi, PLTS, Energi Matahari, Panel Surya, Serang, Cilegon, Banten

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan teknologi di semua bidang. Pemenuhan kebutuhan energi tersebut sebagian besar berasal dari batu bara, minyak bumi dan gas alam yang sangat terbatas karena termasuk energi tak terbarukan. Dengan kebutuhan energi

yang begitu banyak bahan bakar fosil dan gas bumi tidak mampu mencukupi semua kebutuhan, maka untuk memenuhi kebutuhan tersebut dimanfaatkan energi terbarukan yaitu energi yang tidak akan ada habisnya. Selain keterbatasan tersebut batu bara dan minyak bumi menimbulkan pencemaran lingkungan. Indonesia yang merupakan negara yang berkomitmen dalam menurunkan *global*

warming. Sehingga perlukan upaya nyata untuk mendukung komitmen tersebut. Untuk mengatasi kebutuhan energi dan mendukung penurunan global warming diperlukan alternatif sumber energi lain yang berasal dari energi terbarukan dan ramah lingkungan [9]. Salah satu energi terbarukan serta ramah lingkungan yaitu energi matahari. Beban energi listrik terdiri atas beban rumah tangga, industri, bisnis, sosial, gedung kantor pemerintahan dan penerangan jalan umum. Akan tetapi secara nasional beban energi terbesar adalah beban rumah tangga yang mencapai 41,17%. Untuk mengatasi hal tersebut maka potensi pemanfaatan ruang terbuka dikawasan perumahan layak untuk dianalisis dari segi potensi, kontribusi maupun investasi pengembangan PLTS di Banten khususnya pada kawasan perumahan Serang Cilegon. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui potensi energi matahari sebagai pembangkit listrik di kawasan perumahan Serang - Cilegon, mengetahui analisa biaya (*cost*) pemanfaatan energi matahari sebagai pembangkit listrik dan menentukan kontribusi energi matahari sebagai pembangkit listrik di kawasan perumahan Serang Cilegon.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Energi atau tenaga adalah kemampuan suatu benda untuk melakukan usaha atau kerja. Menurut hukum kekekalan energi, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Energi matahari berasal dari proses fusi termonuklir yang mengubah oksigen menjadi helium pada inti matahari. Untuk mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik adalah dengan pemanfaatan panel surya. Untuk mengetahui besarnya daya sesaat yang dihasilkan panel surya maka diperlukan data daya yang diterima permukaan panel terhadap besarnya intensitas cahaya matahari. Persamaan energi adalah sebagai berikut [2].

$$W = P \times t \tag{1}$$

Daya tersebut merupakan perkalian antara luas permukaan panel surya dengan besarnya intensitas cahaya matahari yang diterima untuk waktu tertentu. Persamaannya adalah sebagai berikut [5].

$$P_{in} = I_r \times A \tag{2}$$

Tegangan keluaran atau output dari panel surya merupakan perkalian antara arus hubung singkat (I_{SC}), tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dan *Fill Factor* (FF). Persamaannya adalah sebagai berikut [2]:

$$P_{out} = I_{SC} \times V_{OC} \times FF \tag{3}$$

nilai FF diperoleh dengan persamaan [2]:

$$FF = \frac{(V_{MPP} \times I_{MPP})}{V_{OC} \times I_{SC}} \tag{4}$$

Adapun persamaan efisiensi sesaat yang terukur sebagai berikut [1].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{5}$$

Dengan demikian maka persamaan besarnya efisiensi pembangkitan sesaat panel surya [5] adalah sebagai berikut:

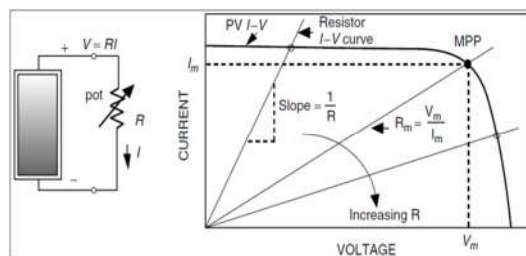
$$\eta_{sesaat} = \frac{P}{I_r \times A} \times 100\% \tag{6}$$

Kapasitas daya yang dibangkitkan PLTS (*Watt Peak*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [7]:

$$P_{Watt\ peak} = Area\ array \times PSI \times \eta_{pv} \tag{7}$$

Berdasarkan daya daya pembangkitan PLTS maka jumlah panel yang diperlukan dalam pengembangan PLTS dihitung dengan persamaan sebagai berikut [8].

$$Jumlah\ panel\ surya = \frac{P_{Watt\ Peak}}{P_{MPP}} \tag{8}$$



Gambar 1. karakteristik pembebanan resistif [5]

Kapasitas total baterai (Ah) yang dibutuhkan pada sistem PLTS dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [7].

$$A_{\text{baterai}} = I = \frac{E_L}{(\%Max\ DOD) \times (TCF) \times V_{\text{baterai}}} \times AD \tag{9}$$

Kapasitas minimum inverter diperoleh dengan mempertimbangkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor*.

Adapun persamaan kapasitas minimum inverter adalah sebagai berikut [10]:

$$P = \frac{E_L \times FM \times EM}{CF} \quad (10)$$

Faktor pemulihan modal dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut [8].

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

Biaya energi PLTS dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut [7]:

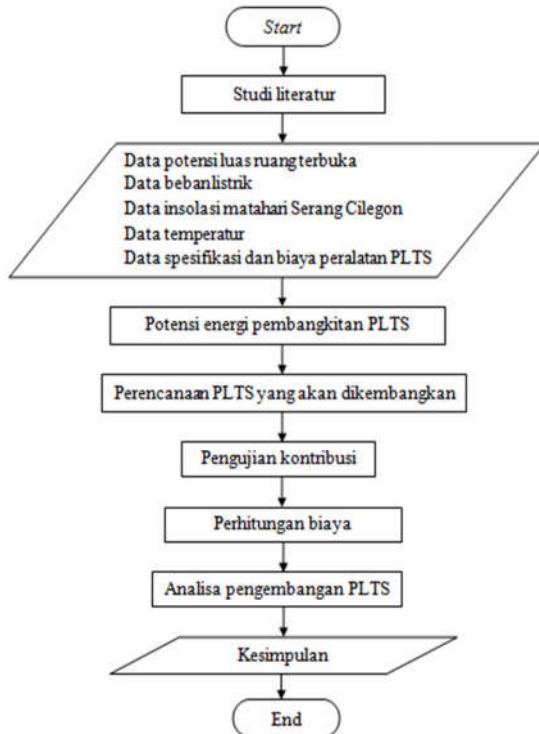
$$COE = \frac{LCC \times CRF}{A \text{ kWh}} \quad (12)$$

Net Present Value (NPV) merupakan seluruh aliran kas bersih dinilaisekarangkan atas dasar faktor diskonto (*discount factor*). Adapun persamaannya adalah sebagai berikut [3].

$$NPV = \sum_{t=1}^n \left(\frac{NCF_t}{(1+r)^t} \right) + II \quad (13)$$

III. METODE PENELITIAN

Langkah penelitian potensi dan kontribusi energi matahari sebagai pembangkit listrik di kawasan perumahan Serang Cilegon dapat diamati pada diagram alir sebagai berikut.



Gambar 2. Diagram alir perencanaan penelitian

Penjelasan dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut :

Tahap pertama yaitu pengumpulan data data-data pendukung yaitu data luas ruang terbuka pada masing-masing perumahan di kawasan Serang - Cilegon, data beban listrik di kawasan perumahan Serang - Cilegon serta pengukuran dan pengamatan langsung data insolasi matahari, energi konversi panel surya dan temperatur panel surya di kawasan perumahan Serang - Cilegon. Data luas ruang terbuka diperoleh dari dinas masing-masing daerah yaitu Dinas Tata Kota Cilegon, Dinas Tata Kota - Serang dan Dinas Tata Ruang dan Bangunan Kabupaten Serang.

Tahap yang kedua yaitu perhitungan potensi energi pembangkitan PLTS dilakukan berdasarkan luas area potensi PLTS untuk wilayah Serang Cilegon.

Tahap yang ketiga yaitu perencanaan pembangkit listrik tenaga surya dilakukan dengan menentukan sistem yang digunakan pada pembangkit listrik. Adapun perencanaan PTLIS meliputi penentuan luas area potensi pengembangan PLTS, menentukan kapasitas inverter, menentukan orientasi panel surya, menentukan kapasitas baterai.

Tahap ke empat pengujian kontribusi PLTS dilakukan dengan menggunakan *Software PvSyst*. Adapun tahapan pengujian kontribusi PLTS meliputi beberapa tahapan diantaranya penunjukan proyek, orientasi dan sistem.

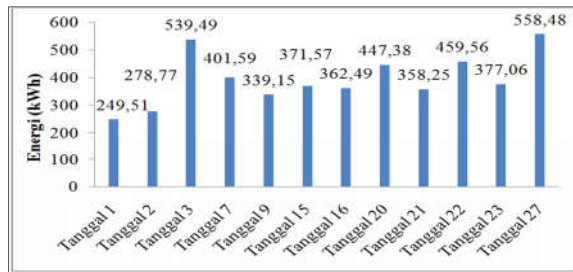
Tahap kelima yaitu perhitungan biaya pada sistem PLTS meliputi biaya investasi awal, Biaya operasional dan pemeliharaan, biaya siklus hidup, dan biaya Energi dan biaya pengembalian investasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

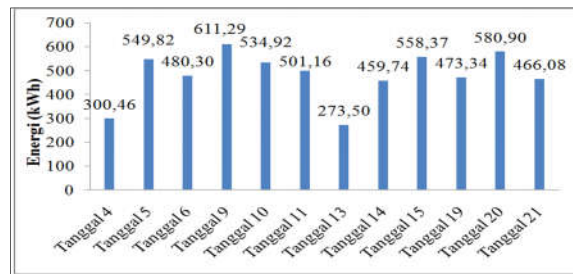
A. Hasil Pengukuran Energi Matahari

Pengukuran energi matahari dilakukan di beberapa titik untuk memperoleh energi rata-rata yang dihasilkan panel surya. Lokasi pengukuran yaitu pada perumahan Krakatau Steel (5°59'49" LS) - Kota Cilegon, Bumi Waringin Asri (6°03'56" LS) - Kabupaten Serang, Highland Park (6°08'10" LS) - Kota Serang dan Bumi Cikande Indah (6°12'55" LS) - Kabupaten Serang.

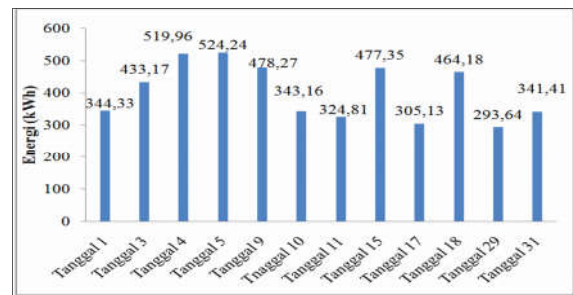
Adapun hasil pengukuran pembebanan panel surya dengan menggunakan baterai adalah sebagai berikut.



Gambar 3. Pengujian pengisian baterai Maret 2013



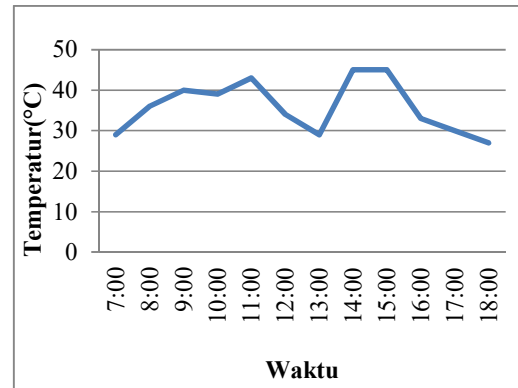
Gambar 4. Pengujian pengisian baterai April 2014



Gambar 5. Pengujian pengisian baterai Mei 2014

Pengisian baterai selama tiga bulan yaitu pada bulan Maret, April dan Mei tersebut dilakukan dengan menghubungkan baterai dengan keluaran panel surya yang di kontrol dengan *Solar Charger Controller* sejak pukul 07.00 hingga pukul 18.00. Hasil pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa daya pengisian terbesar pada bulan Maret sebesar 96,18 Watt, daya pengisian terbesar pada bulan April sebesar 101,02Watt dan daya pengisian terbesar pada bulan Mei sebesar 88,08 Watt. Daya pengisian baterai sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang diterima panel surya.

Adapun salah satu hasil pengujian temperatur panel surya adalah sebagai berikut.



Gambar 6. Grafik pengukuran temperatur pada 19 April 2014

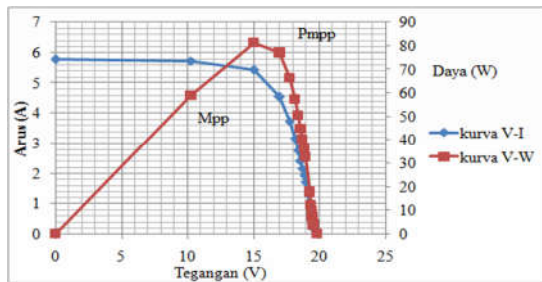
Pengukuran temperatur permukaan panel surya dilakukan selama 3 bulan yaitu pada bulan Maret, April dan Mei. Pengujian tersebut dilakukan dengan menggunakan *thermocouple* dengan menempelkan ujung *thermocouple* pada permukaan panel surya. Berdasarkan pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa temperatur tertinggi pada permukaan panel surya selama bulan Maret adalah sebesar 48°C, temperatur tertinggi pada permukaan panel surya selama bulan April sebesar 62°C dan temperatur tertinggi pada permukaan panel surya selama bulan Mei sebesar 57°C.

Pengujian daya maksimum (P_{MPP}) dengan menggunakan beban *variable resistive* dari 1 ohm hingga 100 ohm yang terhubung dengan ke *output* panel surya dapat diamati pada salah satu hasil pengukuran sebagai berikut.

Tabel 1. Pengukuran beban resistif

R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
1	10,27	5,73	58,85
2	15,02	5,42	81,41
3	16,98	4,54	77,09
4	17,75	3,74	66,39
5	18,16	3,16	57,39
6	18,41	2,74	50,44
7	18,59	2,41	44,80
8	18,69	2,15	40,18
9	18,84	1,94	36,55
10	18,94	1,72	32,58
20	19,27	0,92	17,73
30	19,33	0,64	12,37
40	19,44	0,50	9,72
50	19,47	0,38	7,40
60	19,50	0,32	6,24
70	19,51	0,27	5,27
80	19,53	0,24	4,69
90	19,54	0,21	4,10
100	19,54	0,20	3,91

Berdasarkan hasil pengukuran tersebut diperoleh P_{MPP} sebesar 81,41 Watt pada beban 2Ω dengan tegangan 15,02 Volt dan arus 5,42 Ampere. Tegangan dan arus tersebut merupakan tegangan keluaran maksimum (V_{MP}) dan Arus keluaran maksimum (I_{MP}). Berdasarkan hasil pengukuran pada pukul 10.00 April 2014 Tegangan open circuit (V_{OC}) yang terukur 19,80 Volt dan arus short circuit (I_{SC}) 5,77 Ampere. Berdasarkan Tabel 2 dapat digambarkan pada grafik sebagai berikut.



Gambar 7. Kurva P_{MPP}

Dari hasil pengukuran tersebut maka perhitungan *Fill Factor* (FF) berdasarkan persamaan (4) adalah sebagai berikut.

$$FF = \frac{(V_{mpp} \times I_{mpp})}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{(15,02 \times 5,42)}{19,80 \times 5,77} = \frac{81,4084}{114,246} = 0,71257$$

Dari hasil perhitungan tersebut maka daya keluaran panel surya diperhitungkan berdasarkan persamaan (3) adalah sebagai berikut.

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF = 19,80 \text{ V} \times 5,77 \text{ A} \times 0,71257 = 81,4083 \text{ Watt}$$

Intensitas cahaya matahari yang terukur pada Solar Power Meter sebesar 821 W/m^2 dan luas permukaan panel $0,7936 \text{ m}^2$. Sehingga efisiensi sesaat konversi pembangkitan panel surya dapat diperhitungkan dengan persamaan (6) sebagai berikut.

$$\eta_{sesaat} = \frac{P}{I_r \times A} \times 100\% = \frac{81,4083 \text{ W}}{821 \text{ W/m}^2 \times 0,7936 \text{ m}^2} \times 100\% = 12,49\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh energi konversi panel surya yang dapat diamati pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 2. Energi konversi panel surya pada bulan Maret 2014

Tanggal	Energi Konversi (Wh/Hari)	Insolasi Matahari (Wh/m ² /hari)
1 Maret 2014	268,15	2642
2 Maret 2014	295,08	3285
3 Maret 2014	581,38	6383
7 Maret 2014	373,27	4286
9 Maret 2014	371,55	3916
15 Maret 2014	423,88	4323
20 Maret 2014	524,52	5252
21 Maret 2014	392,29	3971
22 Maret 2014	478,72	4919
16 Maret 2014	448,24	4692
23 Maret 2014	466,15	4807
27 Maret 2014	579,22	6044
Energi Rata-rata	396,44	4588,25

Tabel 3. Pengukuran energi konversi panel surya pada bulan April 2014

Tanggal	Energi Konversi (Wh/Hari)	Insolasi Matahari (Wh/m ² /hari)
9 April 2014	650,25	6574
10 April 2014	526,36	5681
11 April 2014	516,05	5325
13 April 2014	288,08	3029
20 April 2014	624,26	6477
21 April 2014	503,11	4853
14 April 2014	482,45	5115
15 April 2014	573,79	6131
19 April 2014	484,96	4875
4 April 2014	315,40	3127
5 April 2014	573,53	5690
6 April 2014	511,59	5183
Energi Rata-rata	496,28	5186,33

Tabel 4. Pengukuran energi konversi panel surya pada bulan Mei 2014

Tanggal	Energi Konversi (Wh/Hari)	Insolasi Matahari (Wh/m ² /hari)
1 Mei 2014	365,15	3711
17 Mei 2014	313,53	3476
18 Mei 2014	476,58	5266
5 Mei 2014	553,98	5650
9 Mei 2014	499,31	5292
10 Mei 2014	341,52	3731
15 Mei 2014	496,78	5526
29 Mei 2014	312,71	3230
31 Mei 2014	360,24	3809
3 Mei 2014	432,32	4645
4 Mei 2014	601,45	6299
11 Mei 2014	328,08	3561
Energi Rata-rata	423,47	4516

B. Kapasitas Inverter

Perhitungan kapasitas inverter dilakukan untuk memperoleh kapasitas inverter yang sesuai beban yang akan disuplai PLTS. Beban energi yang akan disuplai inverter dipengaruhi oleh luas area panel surya, insolasi matahari (Gav), efisiensi panel surya (η_{pv}), faktor koreksi temperatur, dan efisiensi. Hasil pengukuran diperoleh temperatur maksimum panel surya mencapai $62^{\circ}C$. Selisih kenaikan temperatur tersebut terhadap temperatur standar panel surya (25°) yaitu sebesar $37^{\circ}C$. Penurunan daya keluaran panel surya terhadap kenaikan temperatur tersebut adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{saat suhu naik } t^{\circ}C} &= [(0,5\%/^{\circ}C) \times P_{MPP} \times t^{\circ}C] \\
 &= [(0,5\%/^{\circ}C) \times 100Wp \times 37^{\circ}C] \\
 &= 18,5 W
 \end{aligned}$$

Selisih penurunan daya tersebut menyebabkan penurunan daya maksimum P_{MPP} saat kenaikan $37^{\circ}C$ yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_{MPP \text{ saat suhu naik } t^{\circ}C} &= P_{MPP} - P_{\text{saat suhu naik } t^{\circ}C} \\
 &= 100 W - 18,5 W \\
 &= 81,5 W
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan penurunan daya maksimum P_{MPP} saat kenaikan $37^{\circ}C$ dapat diperoleh besarnya nilai TFC yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 TFC &= \frac{P_{MPP \text{ saat suhu naik } t^{\circ}C}}{P_{MPP}} \\
 &= \frac{18,5}{100} \\
 &= 0,185
 \end{aligned}$$

Pada penelitian ini insolasi harian matahari menggunakan insolasi rata-rata harian terkecil pada saat pengukuran yaitu sebesar $4516,33 \text{ Wh/m}^2$ atau $4,516 \text{ kWh/m}^2$ dan efisiensi kerja sebesar 90%. Beban yang akan disuplai inverter sebesar 2620 diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 EL &= PV_{\text{area}} \times Gav \times \eta_{pv} \times TCF \times \eta_{out} \\
 &= 6273,87 \times 4,516 \times 0,1261 \times 0,815 \times 0,9 \\
 &= 2620,624 \text{ kW} / \text{ari}
 \end{aligned}$$

Pada penelitian ini menggunakan presentasi asumsi losses yang menggunakan peralatan baru menurut (Custer, 2012) sebesar 15%. Kebutuhan beban yang disuplai PLTS dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Et &= \text{Kebutuhan Energi Listrik} + \text{Kerugian sistem} \\
 &= \text{Kebutuhan Energi Listrik} + (15\% \times \text{Kebutuhan Energi Listrik}) \\
 &= 2620,624 + (15\% \times 2620,624) \\
 &= 3013,718 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan kebutuhan beban yang harus disuplai inverter maka kapasitas minimum inverter diperoleh dari persamaan (10) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{EL_{BP} \times FM \times EM}{CF} \\
 &= \frac{125,572 \text{ kW} \times 1,1 \times 1,1}{0,9} \\
 &= 168,824 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Pemilihan inverter disesuaikan terhadap rating terdekat dari kapasitas minimum inverter dengan kapasitas inverter yang tersedia dipasaran. Pada penelitian ini menggunakan rating kapasitas inverter 30 kW dan tegangan sistem 360 Volt. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka dipilih inverter dengan rating kapasitas 30 kW sebanyak 6 inverter terhubung paralel dengan input nominal MPP Voltage 360 volt. Adapun kapasitas minimum inverter dan jumlah kebutuhan inverter dapat diamati pada Tabel 5 sebagai berikut.

Tabel 5. Kapasitas Inverter

Perumahan	Beban disuplai (kW)	Kapasitas Minimum Inverter (kW)	Jumlah Kebutuhan Inverter
Kota Cilegon			
Taman Cilegon Indah	125,572	168,82	6
Metro Cilegon	362,424	487,26	17
Pondok Cilegon Indah	19,723	26,52	1
Kota Serang			
Bumi Mutiara Serang	85,664	115,17	4
Highland Park	8006,003	10763,63	359
Kabupaten Serang			
Puri Hijau Regency	1076,007	1446,63	49
Griya Serdang Indah	1194,896	1606,47	54
Griya Permata Serang	2962,387	3982,76	133
Villa Permata Hijau	936,963	1259,69	42

Sankyu	1307,380	1757,70	59
Mata Raya	77,074	103,62	4
Griya Cilegon	817,473	1099,05	37
Pesona Cilegon	2487,709	3344,59	112
Nusaraya Residence	174,447	234,53	8
Harjatan Heritage	101,642	136,65	5
Pejanten Mas Estate	862,427	1159,48	39
Bumi Baros Chasarah	586,240	837,60	28
Bumi Waringin Asri	299,820	403,09	14
Bumi Cikande Indah	623,007	788,17	27

yang akan dikembangkan dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah string panel surya} &= 7912 \div 22 \\ &= 359,64 \sim 359 \end{aligned}$$

Energi yang dihasilkan pada rangkaian panel surya tersebut diperhitungkan sebagai berikut.

$$I_{MPP \text{ array}} = 5,84 \times 359 = 2096,56 \text{ A}$$

$$V_{MPP \text{ array}} = 17,1 \times 22 = 376,2 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} P_{MPP \text{ array}} &= 2096,56 \text{ A} \times 376,2 \text{ V} \\ &= 788725,87 \text{ W} \sim 788,73 \text{ kW} \end{aligned}$$

C. Kapasitas dan Jumlah Panel Surya

Kapasitas pembangkitan PLTS diperoleh dengan mengalikan luas area *array*, *Peak Solar Insulation* (PSI) adalah 1000 W/m^2 dan efisiensi panel surya yaitu sebesar 12,61% sesuai dengan panel surya yang digunakan pada pengukuran penelitian ini. Besarnya daya pembangkitan PLTS dihitung dengan persamaan (7) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P &= 6273,87 \text{ m}^2 \times 1000 \text{ W/m}^2 \times 12,61\% \\ &= 791135,007 \text{ Wp} \sim 791,135 \text{ kWp} \end{aligned}$$

Panel surya yang digunakan pada penelitian ini sesuai STC memiliki spesifikasi P_{MPP} sebesar 100W dengan arus keluaran maksimum (I_{MP}) sebesar 5,84 A dan tegangan keluaran maksimum (V_{MP}) sebesar 17,1 volt. Berdasarkan spesifikasi panel maka jumlah kebutuhan panel surya diperoleh dengan persamaan (8) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Panel} &= \frac{\text{Daya Pembangkitan (Wp)}}{P_{MPP \text{ Panel}}} \\ &= \frac{791135 \text{ Wp}}{100 \text{ Wp}} \\ &= 7911,35 \sim 7912 \text{ Panel} \end{aligned}$$

Agar rating tegangan sistem sesuai dengan 360V maka pada satu string rangkaian panel surya disusun seri dengan jumlah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah panel susun seri} &= 360 \text{ V} \div 17,1 \text{ V} \\ &= 21,05 \sim 22 \end{aligned}$$

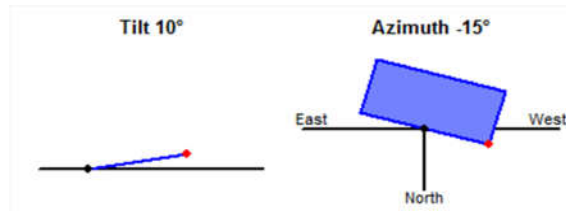
Total panel surya pada sistem PLTS sebanyak 6469988 Panel tersebut dirangkai sebanyak 22 dengan susunan seri sehingga jumlah string panel surya pada sistem PLTS

Tabel 6. Kebutuhan panel surya

Perumahan	Jumlah Kebutuhan Panel			Jumlah panel
	Kapasitas (kWp)	Susunan Paralel	$P_{MPP \text{ array}}$ (kWp)	
Kota Cilegon				
Taman Cilegon Indah	791,135	359	788,726	7898
Metro Cilegon	2283,368	1037	2278,297	22814
Pondok Cilegon Indah	124,258	56	123,032	1232
Kota Serang				
Bumi Mutiara Serang	539,708	245	538,267	5390
Highland Park	5044,000	22927	50370,802	504394
Kabupaten Serang				
Puri Hijau Regency	6779,136	3081	6768,982	67782
Griya Serang Indah	7528,170	3421	7515,964	75262
Griya Permata Serang	18663,847	8483	18637,219	186626
Villa Permata Hijau	5903,119	2683	5894,572	59026
Sankyu	8236,852	3744	8225,598	82368
Mata Raya	485,585	220	483,342	4840
Griya Cilegon	5150,302	2341	5143,196	51502
Pesona Cilegon	15673,246	7124	15651,485	156728
Nusaraya Residence	1099,062	499	1096,307	10978
Harjatan Heritage E.	640,374	291	5894,572	6402
Pejanten Mas	5433,523	2469	8225,598	54318
Bumi Baros Chasarah	3693,469	1678	483,342	36916
Bumi Waringin Asri	1888,945	858	5143,196	18876
Bumi Cikande Indah	3693,469	1678	3686,579	36916
Jumlah	141637,285			1416162

D. Orientasi Panel Surya

Berdasarkan hasil penelitian Hardiansyah (2012) dengan menggunakan *solar tracker* diperoleh sudut azimuth optimum panel surya untuk Serang Cilegon sebesar -15^0 dari barat. Adapun ilustrasi orientasi panel surya dapat diamati pada Gambar 8 sebagai berikut.



Gambar 8. Orientasi panel surya

E. Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai dapat dihitung dengan persamaan (9) sebagai berikut.

$$= \frac{7871,2 \text{ kW} / \text{ari}}{(0,8) \times (0,815) \times (360)} \times 3$$

$$= 100603,272 \text{ Ah}$$

Kebutuhan kapasitas baterai 100603,272 Ah pada penelitian ini menggunakan baterai dengan kapasitas 1156Ah dengan tegangan 6 Volt. Untuk memenuhi tegangan 360V maka dibutuhkan 87,03 ~ 88 string dengan setiap string terdiri atas 60 baterai terangkai seri. Sehingga kebutuhan total baterai pada sistem PLTS sebanyak 5280 unit.

F. Analisis Biaya PLTS

Berdasarkan hasil perhitungan investasi awal untuk salah satu perumahan yaitu sebesar \$ 8675567. Besarnya Biaya operasional dan pemeliharaan PLTS setiap tahunnya (M) adalah sebagai berikut.

$$(M) = 1\% \times \text{Biaya Investasi Awal}$$

$$= 1\% \times 8675567$$

$$= \$ 86755,67$$

Pada penelitian ini suku bunga kredit sebesar 10,04%. Besarnya nilai sekarang untuk biaya jangka panjang operasional dan pemeliharaan (M_{pw}) diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut.

$$M_{pw} = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]$$

$$= 86755,67 \left[\frac{(1+0,1004)^{25} - 1}{0,1004(1+0,1004)^{25}} \right]$$

$$= \$ 785068,91$$

Biaya siklus hidup dari PLTS yang akan dikembangkan di kawasan perumahan Serang Cilegon berdasarkan biaya investasi awal (C) dan perhitungan M_{pw}. adalah sebagai berikut.

$$LCC = C + M_{pw}$$

$$= 86755,67 + 785068,91$$

$$= \$ 9460635,91$$

Biaya energi (*cost of energy*) suatu sistem PLTS dipengaruhi oleh biaya siklus hidup (LCC), faktor pemulihan modal (CRF) dan kWh produksi tahunan. Faktor pemulihan modal merupakan konversi semua arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi biaya tahunan.

Faktor pemulihan modal CRF diperoleh dengan persamaan (11) sebagai berikut.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

$$= \frac{0,1004(1+0,1004)^{25}}{(1+0,1004)^{25} - 1} = \frac{1,0977}{9,934} = 0,1105$$

kWh produksi tahunan pada sistem PLTS yang akan dikembangkan di kawasan perumahan Taman Cilegon Indah diperoleh dari hasil simulasi yaitu 553658 kWh. Berdasarkan hasil perhitungan LCC, CRF dan kWh produksi tahun sistem PLTS maka diperoleh biaya energy (COE) dengan persamaan (12) sebagai berikut.

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{A \text{ kW}}$$

$$= \frac{9460635,91 \times 0,1105}{553658}$$

$$= \$ 1,888 / \text{kW}$$

Tabel 7. Biaya investasi PLTS kawasan perumahan Serang Cilegon

Perumahan	Biaya PLTS		
	Investasi Awal (US\$)	M _{pw} (US\$)	LCC (US\$)
Kota Cilegon			
Taman Cilegon Indah	8675567	785068,91	9460635,91
Metro Cilegon	7745081	700867,42	8445948,42
Pondok Cilegon Indah	31500563	2850547,14	34351110,14
Kota Serang			
Bunni Mutiara Serang	1988195	179915,63	2168110,63
Highland Park	65871921	5960878,09	71832799,09
Kabupaten Serang			
Puri Hijau Regency	8987593	813304,75	9800897,75
Griya Serdang Indah	29909463	2706565,41	32616028,41
Griya Permata Serang	28866269	2612164,75	31478433,75
Villa Permata Hijau	9199059	832440,72	10031499,72
Sanky	16216027	1467419,78	17683446,78

Mata Raya	1137045	102893,41	1239938,41
Griya Cilegon	10271553	929492,78	11201045,78
Pesona Cilegon	23132297	2093286,49	25225583,49
Nusaraya Residence	1899507	171890,08	2071397,08
Harjatani Heritage	4997533	452236,47	5449769,47
Pejanten Mas	9313177	842767,48	10155944,48
Bumi Baros Chasanah	5423837	490813,55	5914650,55
Bumi Waringin Asri	6728629	608886,71	7337515,71
Bumi Cikande Indah	8019219	725674,70	8744893,70

Net present value (NPV) pada sistem PLTS yang akan dikembangkan dengan suku bunga kredit bank 10,04% maka diperoleh dengan persamaan (13) sebagai berikut.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t}$$

NCF_t merupakan perkalian antara kWh produksi tahunan sistem PLTS dan biaya energi. Sehingga NCF_t adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} NCF_t &= (A \text{ kW} \times COE) \times M \\ &= (553658 \times 1,888) \times 86755,67 \\ &= \$ 958644,598 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan NCF_t maka NPV pengembangan sistem PLTS adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} NPV &= 958644,598 \times \frac{1}{(1 + 0,1004)^t} \\ &= \$ 871178,297 \end{aligned}$$

Perhitungan *Discounted Payback Period* (DPP) diperoleh dengan menghitung periode nilai sekarang arus kas bersih kumulatif (Kumulatif PVNCF) dalam tahun akan sama dengan nilai investasi awal. berdasarkan arus kas bahwa pada tahun ke-25, *Kumulatif PVNCF* mendekati nilai investasi awal dengan kekurangan sebesar US\$ 605,814. Selisih *Kumulatif PVNCF* tahun ke-25 dan tahun ke-26 adalah sebesar US\$ 79678,749. Untuk dapat menutupi kekurangan tersebut maka diperhitungkan dengan $605,814/79678,749 = 0,076$ dari 12 bulan maka diperlukan sekitar 1 bulan.

DPP dengan jangka waktu 25 tahun 1 bulan menunjukkan bahwa investasi yang akan dikembangkan di kawasan perumahan Serang Cilegon tidak layak untuk dilaksanakan. Hal ini disebabkan waktu DPP lebih besar dari periode umur proyek yang ditetapkan selama 25 tahun.

G. Kontribusi

Kontribusi energi matahari di kawasan perumahan Serang Cilegon dilakukan dengan *software PvSyst* untuk memperoleh energi konversi panel surya dan energi suplai yang akan disalurkan ke beban rumah tangga di kawasan perumahan Serang Cilegon. Kontribusi merupakan perbandingan antara beban energi di kawasan perumahan Serang Cilegon dengan energi yang disuplai PLTS. Adapun kontribusi energi dengan insolasi matahari dan temperatur berdasarkan data BMKG Serang dapat diamati pada Tabel 8 sebagai berikut.

Tabel 8. Kontribusi energi matahari

Perumahan	Energi Konversi	Energi Suplai	Kontribusi
Taman Cilegon Indah	602203	553658	19,27%
Metro Cilegon	1715881	1577579	86,19%
Pondok Cilegon Indah	98387	90452	0,76%
Bumi Mutiara Serang	404211	371632	76,87%
Highland Park	36707706	33750047	Terpenuhi
Puri Hijau Regency	4988602	4586608	Terpenuhi
Griya Serdang Indah	5509174	5065257	Terpenuhi
Griya Permata Serang	13594409	12499054	Terpenuhi
Villa Permata Hijau	4294821	3948774	Terpenuhi
Sankyu	6022074	5536834	Terpenuhi
Mata Raya	391344	359775	Terpenuhi
Griya Cilegon	3773453	3469394	Terpenuhi
Pesona Cilegon	11439204	10517486	Terpenuhi
Nusaraya Residence	812629	747141	Terpenuhi
Harjatani Heritage	497725	457594	29,37%
Pejanten Mas	3978077	3657531	Terpenuhi
Bumi Baros Chasanah	2861138	2630603	Terpenuhi
Bumi Waringin Asri	1414974	1300930	80,19%
Bumi Cikande Indah	2739794	2518996	Terpenuhi

Berdasarkan data Insolasi matahari hasil pengujian dan temperatur panel surya dapat diamati kontribusi suplai energi matahari terhadap beban pemakaian rumah tangga pada bulan Maret, April dan Mei dapat diamati pada Tabel 9 sebagai berikut.

Tabel 9. Kontribusi hasil pengujian

Perumahan	Kontribusi Hasil Pengujian					
	Maret		April		Mei	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Taman Cilegon Indah	47530	1991	47631	1848	47488	17,71
Metro Cilegon	135506	96,16	135590	91,58	135169	81,87
Pondok Cilegon Indah	7742	083	7808	078	7789	075
Bumi Mutiara Serang	31925	9082	31935	7383	31836	71,1
Highland Park	2908581	357	2899947	374	2886283	4,2
Puri Hijau Regency	394387	397	393591	409	392470	4,36
Griya Serdang Indah	43569	6932	434408	7428	433305	80,15
Griya Permata Serang	1075274	1434	1071816	1633	1068964	17,92

Villa Permata Hijau	339724	185	338589	1888	337693	18,94
Sankyu	476246	3603	474911	3894	473617	41,83
Mata Raya	30766	4774	31092	5260	31014	56,29
Griya Cilegon	298387	3807	297624	41,33	296801	43,06
Pesona Cilegon	904724	560	902013	621	899584	6,37
Nusaraya Residence	64224	2271	64143	2450	63952	25,44
Harjatan Heritage	39245	3369	39421	3081	39314	29,17
Pejanten Mas	314574	2350	313754	2948	312889	27,96
Bumi Baros Chasarah	226299	612	225590	623	224988	6,44
Bumi Waringin Asri	111760	8304	111787	8495	111440	82,22
Bumi Cikande Indah	216504	4865	216299	4772	215646	49,99

Insolasi matahari dan temperatur sangat mempengaruhi energi konversi panel surya sehingga berdampak pada energi yang disuplai ke beban.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada kawasan perumahan Serang Cilegon sebanyak 19 perumahan berpotensi dalam pengembangan PLTS di area terbuka dengan kapasitas total 84971,481 kWp. Kebutuhan total jumlah panel surya sebanyak 1416162 buah dengan menggunakan panel surya 100 Wp dengan luas area panel surya 0,7936 m². Potensi terbesar pada perumahan Highland Park dengan kapasitas sebesar 50370,802 kWp dan potensi terkecil pada perumahan Pondok Cilegon Indah dengan kapasitas sebesar 123,032 kWp. Sudut orientasi panel surya dengan tilt angle 100 dan sudut azimuth -150 dari barat.
2. Investasi PLTS dengan *project life* selama 25 tahun membutuhkan waktu pengembalian biaya investasi selama 25 tahun 1 bulan terhitung awal berdirinya proyek sehingga tidak layak secara aspek ekonomi
3. Berdasarkan hasil simulasi kontribusi dengan menggunakan data BMKG Serang pada kawasan perumahan Serang Cilegon diperoleh total energi konversi 101845806 kWh per tahun dan total energi suplai 93639345 kWh per tahun. Total energi konversi dan energi suplai terbesar yaitu pada perumahan Highland Park dengan energi konversi 36707706 kWh per tahun dan energi suplai 33750047 kWh per tahun yang mampu memenuhi kebutuhan energi

listrik serta dengan menggunakan data hasil pengujian diperoleh kelebihan energi pada bulan Maret 96,43%, April 96,26% dan Mei 95,8%. Total energi konversi dan energi suplai terkecil yaitu pada perumahan Pondok Cilegon Indah dengan energi konversi 98387 kWh per tahun dan energi suplai 90452 kWh per tahun yang mampu berkontribusi sebesar 0,76% terhadap kebutuhan energi listrik listrik serta dengan menggunakan data hasil pengujian diperoleh kekurangan energi pada bulan Maret 99,17%, April 99,22% dan Mei 99,24%.

Pada penelitian ini masih terdapat kekurangan sehingga diperlukan penelitian lanjutan tentang pengembangan potensi energi matahari yaitu:

1. Penambahan data pengujian yang lebih banyak agar potensi energi pembangkitan PLTS yang dikembangkan lebih akurat.
2. Sebagai studi lanjutan, perlu dilakukan analisa dampak interkoneksi PLTS terhadap kualitas daya jaringan listrik.

REFERENSI

- [1]. Foster, R., Ghassemi, M., Cota, A. (2010). *Solar Energy Renewable Energy and The Environment*. Boca Raton FL, CRC Press
- [2]. Gilbert, M. Masters. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems Chapter 7 and Chapter 9*. Stanford University: A Jhon Wiley & Sons Inc Publication.
- [3]. Pacticia, Hanna. (2012). *Analisis keekonomian Kompleks Perumahan Berbasis Energi Sel Surya (Studi Kasus Perumahan Cyber Orchid Town House)*. Tugas Akhir Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- [4]. Permana, Hasno. (2014). *Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Energi Pendukung pada Sistem Kelistrikan di Holtel The Royal Krakatau Cilegon*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

- [5]. Muchammad dan Yohana, Eflita. (2010). *Pengaruh Suhu permukaan Photovoltaic Module 50 Watt Peak terhadap daya Keluaran yang dihasilkan menggunakan Reflektor dengan variasi sudut reflektor 0°, 50°, 60°, 70°, 80°*. Jurnal ROTASI – Vol. 12, No. 4, Juli 2010: 14 18
- [6]. Riyadi, Slamet. 2011. *Panel Surya sebagai Energi Alternatif*. Universitas Katolik Soegijapranata: Semarang
- [7]. Safarudin, Ali Imron. (2013). *Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang sebagai Pembangkit Listrik Alternatif*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [8]. Santiari, I Dewa Ayu Sri. (2011). *Studi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Catu daya Tambahan pada Industri Perhotelan di Nusa Lembongan Bali*. Tesis Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana
- [9]. Strzalka, dkk. (2009). *Potential of Roof Top PV-systems for Supplying Electricity in Residential Area Scharnhauser Park*. *Journal IEEE Developments in Renewable Energy Technology* (ICDRET) 2009.
- [10]. Zamroni. (2012). *Kajian Sistem Penyediaan Energi Listrik Hybrid Sel PV - Diesel di Pulau Sebir Kepulauan Seribu*. Jurnal sarjana Institut Teknologi Bandung bidang Teknik Elektro dan Informatika Volume 1, Number 1, April 2012