

**TELAAH POTENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA
PADA LAHAN BUDIDAYA ANGGUR****Ahmad Chidhir Sofyan¹⁾, Ibrahim Nawawi²⁾, Andriyatna Agung Kurniawan³⁾**^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

Jl. Kapten Suparman No.39, Tuguran, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara,

Kota Magelang, Jawa Tengah, 56116

acsofyan89@gmail.com¹, Ibrahim_nw@untidar.ac.id², andriyatna@untidar.ac.id³**Abstract (English)**

Indonesian Presidential Regulation No. 112 of 2022 regulates the limitation and early retirement of coal-fired power plants by accelerating the transition to renewable energy. One of the efficient and environmentally friendly new renewable energy is photovoltaic. Photovoltaic can be implemented with the Agriculture photovoltaic (APV) concept, which combines solar power generation systems (PLTS) and integrated plants in the same land. This study examines the potential of PLTS systems on grape cultivation land to determine the potential for PLTS power generation, costs of energy, potential economic value, and land equivalent ratio. The research was conducted by designing the division of PLTS and grape cultivation using SketchUp and PLTS System Simulation using PVsyst. The results of the potential design of the PLTS system in calculation are able to generate 59.049,168 kWh of energy per year with an cost of energy is Rp 701,05/kWh, a payback period of 2,97 years and an NPV of Rp 858.372.698,91. Simulation produces 62.385 kWh with a cost of energy is Rp 663,56/kWh, a payback period of 2,83 years and NPV of Rp 916.979.491,16. Land equivalent ratio with a result of 1,354.

Abstrak (Indonesia)

Kebijakan Perpres nomor 112 tahun 2022 mengatur pembatasan dan pemberhentian dini pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara dengan mempercepat transisi ke energi baru terbarukan. Salah satu energi baru terbarukan yang efisien dan ramah lingkungan adalah photovoltaic. Photovoltaic dapat diimplementasikan secara konsep *Agriculture photovoltaic* (APV) yaitu menggabungkan Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan tanaman terintegrasi dalam satu lahan yang sama. Penelitian ini mengkaji potensi sistem PLTS di lahan budidaya anggur untuk mengetahui potensi pembangkitan daya PLTS, biaya pembangkitan energi, potensi nilai ekonomi, dan rasio penggunaan lahan. Penelitian dilakukan dengan desain pembagian PLTS dan budidaya anggur menggunakan SketchUp dan Simulasi Sistem PLTS menggunakan PVsyst. Hasil potensi perancangan sistem PLTS secara perhitungan mampu membangkitkan energi 59.049,168 kWh pertahun dengan biaya pembangkitan energi sebesar Rp 701,05/kWh, payback period 2,97 tahun dan NPV Rp858.372.698,91. Simulasi menghasilkan 62385 kWh dengan biaya pembangkitan Rp 663,56/kWh, payback period selama 2,83 tahun dan NPV Rp 916.979.491,16. Rasio penggunaan lahan dengan hasil 1,354.

Article History

Submitted: 24 Juni 2024

Accepted: 27 Juni 2024

Published: 4 Juli 2024

Key Words

Agriculture, APV, grape cultivation, Renewable energy, Photovoltaic

Sejarah Artikel

Submitted: 24 Juni 2024

Accepted: 27 Juni 2024

Published: 4 Juli 2024

Kata Kunci

APV, budidaya anggur, energi terbarukan, pertanian.

PENDAHULUAN

Kebijakan Perpres Nomor 112 Tahun 2022 menyatakan bahwa adanya pengurangan penggunaan PLTU batubara, mempercepat pemberhentian dini PLTU batubara dan menggantikannya dengan energi baru terbarukan (EBT). Salah satu alternatif EBT yang dapat dimanfaatkan untuk mempercepat penggunaan EBT adalah cahaya matahari dengan *Photovoltaics*. Ketersediaan cahaya matahari yang melimpah dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)[1]. *Photovoltaics* dapat diimplementasikan secara inovatif dengan efisiensi lahan seperti sistem *Floating Photovoltaic*, sistem *Agricultural Photovoltaic* (APV) dan *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV).

Agricultural Photovoltaic menggabungkan solar PV dengan sistem pertanian pada lahan yang sama. APV saling menguntungkan untuk produksi pertanian dan pembangkitan listrik dari solar PV[2]. Beberapa penelitian menunjukkan keuntungan seperti produksi listrik dan panen yang lebih tinggi serta efisiensi penggunaan air. Budidaya tanaman di bawah PV mampu mengurangi panas pada panel dikarenakan efek proses transpirasi air[3].

Studi APV pada ladang anggur yang dibagi menjadi 6 bagian terdiri dari tiga bagian untuk APV dengan panel berbeda dan tiga bagian tidak dipasang PV. Panel dipasang dengan 30% shading, dengan hasil panel monofasial menghasilkan 25,2 MWh, panel bifasial menghasilkan 21,6 MWh, dan panel transparan menghasilkan 25.7 MWh selama periode 5 bulan. Budidaya anggur di bawah panel tidak berbeda jauh pada tempat terbuka, hanya mengalami keterlambatan panen 10 hari[4].

Lahan yang sama pada studi APV di atas dilakukan pengamatan pertumbuhan tanaman anggur dan perkembangan beri anggur. Iklim mikro di bawah PV dapat mengurangi kecepatan angin yang tinggi ketika musim dingin, dan suhu tanah yang rendah di bawah panel surya dibandingkan dengan di lahan terbuka. Tidak ada perbedaan yang signifikan dalam karbohidrat total dan tunas pecah pada cabang tersier yang menghasilkan buah di tiap tempat. Kandungan klorofil yang tinggi pada daun anggur yang ditanam di bawah panel, tidak ada perbedaan yang signifikan dalam pertumbuhan tunas, berat beri, berat tandan, kandungan padatan terlarut total dan keasaman beri[5]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa musim panen tertunda 7-10 hari karena masa verasion (perubahan warna) yang lebih lama pada anggur yang ditanam di kebun anggur di bawah panel.

Penelitian potensi APV pada ladang anggur telah dilakukan di India. Penelitian mengeksplorasi kelayakan sistem APV pada ladang anggur berdasarkan toleransi bayangan PV terhadap tanaman anggur dan aspek ekonomi instalasi sistem PV pada lahan 1 acre ladang. Desain PV dipasang di antara kolom tanaman anggur yang berjarak 1,8 m pada tiap kolom berjarak satu kolom. Hasilnya potensi PV output 168,64 KWp dengan panel 310 Wp. Penerapan sistem APV yang diusulkan memiliki nilai 15 kali lipat dibandingkan pertanian konvensional[6].

Penelitian tentang hubungan integrasi antara PV dan ladang anggur diajukan secara vertikal di atas tanaman anggur menggunakan struktur trellis yang sama untuk menghemat biaya konstruksi. Tinggi teralis dibandingkan jarak kolom tanaman anggur adalah 2:3 dinilai mampu mengatur cahaya dan meminimalkan bayangan PV. Beberapa modul yang diajukan dan dievaluasi dengan hasil kapasitas terpasang 40-60% dibandingkan instalasi vertikal PV yang terpasang konvensional dengan mengabaikan bayangan yang di atas daun dan buah. Usulan dinilai layak dengan nilai indikator rasio penggunaan lahan (LER) berkisar 1,27-1,5 [7].

Indonesia yang berada di daerah khatulistiwa memiliki keuntungan dari lokasi dan iklim untuk pertanian dan pembangkit listrik tenaga surya. Lahan budidaya anggur dipilih karena tanaman anggur sekali tanam dapat bertahan hingga puluhan tahun dan sistem teralis yang tidak memakan banyak tempat. Penelitian akan menghitung dan mensimulasikan PLTS on grid untuk mengetahui potensi produksi energi PLTS pada konfigurasi tetap APV. Penelitian akan menghitung biaya pembangkitan energi PLTS dan dibandingkan dengan PLTU batubara. Penelitian menghitung nilai kelayakan ekonomi dari sistem PLTS dan sistem pertanian.

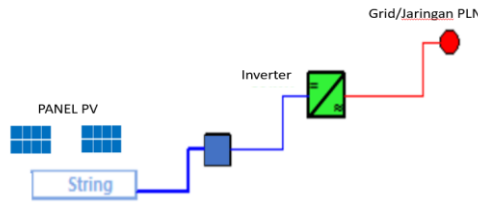
STUDI PUSTAKA

Perancangan sistem PLTS ini perlu mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut:

A. Sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) On Grid

PLTS on grid merupakan pembangkit yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik yang terhubung ke jaringan utility.

Skema single line diagram PLTS on grid ditunjukkan gambar 2.1



Gambar 2.1 Single line diagram PLTS on grid

Komponen penyusun sistem PLTS on grid yaitu:

1. Panel surya

Panel surya berfungsi mengubah energi matahari menjadi energi listrik berupa listrik DC (Direct Current).

2. Inverter on grid

Inverter on grid atau *gried tied inverter* (GTI) merupakan bagian dari *power conditioning* atau pengubah tegangan DC dari panel surya ke tegangan AC yang tersambung ke tegangan jala-jala listrik PLN (Grid). GTI mampu mensinkronisasikan frekuensi dan phase arus yang sama pada grid. Tegangan output GTI disesuaikan lebih tinggi dari tegangan grid agar kelebihan listrik dapat dialirkan keluar ke jaringan[8]. Keuntungan dari GTI yaitu tidak memerlukan baterai dalam pengoperasiannya sehingga biaya awal lebih murah.

3. Power Meter (Net Metering Type)

Net meter atau KWh EXIM merupakan perangkat yang mengukur daya secara dua arah yaitu daya masuk ke pengguna atau sebaliknya. Perusahaan utilitas (PLN) menyediakan perangkat ini dan mengukur daya yang dikirimkan ke jaringan distribusi serta membayar harga untuk daya yang dikirimkan sesuai peraturan yang berlaku yaitu Perpres nomor 112 tahun 2022.

B. Perhitungan Perancangan Sistem PLTS

Ketersediaan lahan atau luasan area menjadi acuan untuk menentukan banyaknya panel yang dapat dipasang. Daya modul dapat dihitung dengan mengetahui luasan *panel* tersedia dengan rumus:

$$P_{\text{modul}} = \text{Area panel} \times \text{PSI} \times \eta_{\text{pv}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

Area array = luasan maksimum tersedia m^2

PSI = *Peak Sun Insulation* sebesar 1000 W/m^2 (STC)

η_{pv} = Efisiensi panel Surya

Setelah mengetahui kapasitas terpasang dari banyaknya panel dikalikan kapasitas panel, maka penentuan inverter dapat dilakukan. Kapasitas inverter yang dapat digunakan harus mendekati kapasitas terpasang. Kapasitas panel terpasang harus lebih besar dari kapasitas inverter dengan dengan rasio 1,1-1,5 banding 1.

Rangkaian panel surya yang terhubung secara seri dan paralel dapat diketahui dengan persamaan:

$$\text{Min seri per string} = \frac{V_{\text{DC min}}}{V_{\text{mp}}} \quad (2.2)$$

$$\text{Maks seri per string} = \frac{V_{\text{dc max}}}{V_{\text{oc}}} \quad (2.3)$$

$$\text{Maks paralel per string} = \frac{I_{\text{dc max}}}{I_{\text{mp}}} \quad (2.4)$$

Keterangan:

Vdc min = tegangan minimum (inverter)

Vdc max = tegangan maksimum (inverter)

Vmp = tegangan daya maksimum PV

Voc = tegangan sirkuit terbuka PV

Imp = arus daya maksimum PV

Sistem PLTS memiliki nilai kerugian sistem akibat adanya pengurangan efisiensi dari komponen terpasang dan perbedaan dari kondisi tes standar PV dengan daya aktual sistem terpasang. Faktor kerugian sistem ditampilkan dalam tabel 2.1

Tabel 2.1 Rugi -rugi sistem PLTS

Faktor rugi-rugi	Nilai rugi
Kotoran (debu, plak, kotoran burung)	2-3%
Perbedaan kinerja antar panel	2-3%
Penurunan daya akibat pengkabelan	2-3%
Efisiensi inverter	2-3%
Bayangan	2-3%
Pemeliharaan sistem	2-3%
Beda Uji standart tes normal (STC) dan standar Uji PVUSA (PTC)	2-3%
Perubahan temperature	5-10%
Total	19%-31%

Perhitungan daya yang dihasilkan modul dapat dihitung untuk mengetahui besaran daya yang dihasilkan sistem PLTS dengan persamaan berikut:

$$\text{Daya modul} = P_{\text{modul}} \times (100\% - \text{total rugi-rugi}) \quad (2.5)$$

$$\text{Daya kapasitas terpasang} = \text{Daya modul} \times \text{jumlah panel} \quad (2.6)$$

$$\text{Eoutput} = \text{Daya kapasitas terpasang} \times \text{PSH} \quad (2.7)$$

$$\text{PSH} = \frac{\text{radiasi matahari} (kWh/m^2)}{1000 W/m^2} \quad (2.8)$$

Keterangan :

Eoutput= Daya keluaran sistem PLTS

PSH= peak sun hour

1. Aspek pembiayaan sistem**a. Operasional dan pemeliharaan sistem**

PLTS membutuhkan 1% dari biaya total investasi awal untuk digunakan dalam operasional dan pemeliharaan per tahun. Persamaan biaya operasional dan pemeliharaan PLTS adalah sebagai berikut:

$$\text{O\&M} = 1\% \times S \quad (2.9)$$

Keterangan:

O&M= biaya operasional dan pemeliharaan

S= nilai investasi awal

b. Biaya siklus hidup (Life Cycle Cost)

Merupakan biaya yang diperlukan selama siklus proyek yang direncanakan. Besarnya LCC ditentukan dari biaya total investasi, biaya pengganti alat, biaya operasi dan pemeliharaan nilai sekarang untuk sebuah proyek.

$$LCC=S+O\&M_{PW}+R_{PW} \quad (2.10)$$

Keterangan:

LCC= biaya siklus hidup

S= nilai investasi awal

O&M_{PW}=biaya operasional dan pemeliharaan selama umur proyek

R_{PW}= biaya pengganti alat biaya pengganti alat

c. Nilai sekarang untuk biaya pengeluaran tetap

(per tahun) dalam jangka waktu umur proyek dapat dihitung dengan persamaan

$$P=A \frac{(1+i)^n}{i(1+i)^n} \quad (2.11)$$

Keterangan:

P = nilai sekarang biaya tahunan selama umur proyek.

A = biaya tahunan

i = tingkat diskonto

n = umur proyek

d. Faktor diskonto (*Discount factor*)

Merupakan parameter untuk menghitung nilai penerimaan dimasa depan di waktu sekarang. Parameter ini dapat membandingkan penerimaan masa depan dengan pengeluaran sekarang. Penerimaan tingkat diskonto menggunakan tingkat suku bunga pasar (tingkat suku bunga bank). Persamaan faktor diskonto sebagai berikut:

$$DF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.12)$$

Keterangan:

DF = faktor diskonto

i = tingkat diskonto

n = periode dalam tahun (umur investasi)

e. Biaya energi (*Cost of Energy*)

Merupakan perbandingan antara biaya total sistem pertahun dengan jumlah produksi energi dalam periode yang sama. Biaya energi PLTS di pengaruhi oleh biaya O&M yang relatif rendah dan investasi awal yang tinggi. Perhitungan biaya energi PLTS menggunakan persamaan berikut :

$$COE = \frac{LCC \times CRF}{A_{kWh}} \quad (2.13)$$

keterangan:

COE = biaya energi (Rp/kWh)

CRF = faktor pemulihan modal

A kWh = daya listrik yang dibangkitkan pertahun (kWh/tahun)

f. Faktor Pemulihan Modal

Merupakan parameter untuk menghitung keseluruhan arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi serangkaian pembayaran pertahun dengan jumlah yang sama. Faktor pemulihan modal dihitung dengan persamaan berikut:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.14)$$

Keterangan:

CRF = faktor pemulihan modal

i = tingkat diskonto

n = periode dalam tahun (umur investasi)

C. *Budidaya Anggur*

Anggur dapat dibudidayakan dengan sistem *trellishing* yaitu pengaturan percabangan dalam penjarangan tersier anggur. Sistem ini berfungsi untuk memaksimalkan sinar matahari dan kemudahan perawatan. Sistem ini dapat dikombinasikan dalam PLTS karena pohon anggur tidak banyak memakan tempat. Salah satu sistem *trellishing* yaitu *vertical shoot positioned trellis* (VSP) dan trellis Y. Sistem VSP merupakan sistem yang membentuk percabangan seperti pagar[9]. Sistem Percabangan anggur dapat dilihat pada gambar 2.4.



(Sumber: Rifki)

Gambar 2.4 Sistem teralis pada Tegal Anggur.

Penggunaan naungan dapat membantu adaptasi tanaman anggur dalam mengatasi perubahan iklim [10]. Penggunaan naungan memiliki efek terhadap perkembangan tumbuh anggur. Penggunaan naungan dengan tingkat bayangan 50% dinilai memberikan klaster buah lebih banyak dan kualitas (berat, panjang, brix) yang lebih dibandingkan dengan tanpa naungan, sinar pagi, sinar sore, tingkat bayangan 80% dan 100% [11]. Penggunaan naungan juga dapat mengatasi efek sunburn pada tanaman anggur dan mengurangi suhu sekitar 7°C serta mengatasi heat stress [12].

Tabel 2.2 Kebutuhan makronutrisi anggur

Peneliti	Makronutrisi		
	Nitrogen (N)	Phosphat (P ₂ O ₅)	Kalium (K ₂ O)
	kg /ha	kg /ha	kg /ha
Buzin	75,50	26,78	76,,27
Mozer	80,00	100,00	250,00
Müntz	37,00	11,00	40,00
Ravaz	15,00	50,00	100,00

Perhitungan prediksi panen anggur dapat dilakukan dengan rumus berikut:

$$PY = (NV \times NC \times CW) / 2000 \quad (2.15)$$

Keterangan :

PY = prediksi panen (ton/ acre)

NV = banyaknya anggur /acre

NC = banyaknya klaster anggur per tanaman

CW = berat klaster anggur (pounds). (kecil <0,29, sedang 0,3-0,39, besar > 0,4 lbs)

Rumus prediksi panen tersebut berlaku untuk satu kali panen yang ada di negara wilayah non tropis. Pembuaian/panen anggur dapat dilakukan 2 kali dalam satu tahun di wilayah tropis.

D. Analisa Ekonomi

◆ Analisa ekonomi diperhitungkan dengan:

1. Payback period

Payback period adalah tolak ukur keuangan yang menunjukkan berapa lama waktu yang dibutuhkan investasi mencapai nilai uang sebanyak biaya dikeluarkan diawal. Persamaan *Payback period* sebagai berikut:

$$PBX = \frac{\text{Investasi Awal}}{\text{Pendapatan}} \times 1 \text{ tahun} \quad (2.16)$$

Keterangan: PBX = *Payback period*

Investasi Awal = total investasi yang di keluarkan

Pendapatan = Keuntungan dari usaha yang dihasilkan tiap tahun.

2. Net Present Value (NPV)

Net present value adalah cara mengevaluasi investasi dengan membandingkan arus kas masa mendatang yang direncanakan dengan biaya awal. NPV memperhitungkan diskon pada tiap nilai arus kas masa mendatang (baik penerimaan dan pengeluaran) yang dihasilkan dari proyek inovasi yang dilakukan dengan tingkat diskon tertentu yang kemudian dijumlahkannya [13].

$$NPV = -S + \sum_{t=0}^n \frac{NCF_t}{(1-r)^t} \quad (2.17)$$

Keterangan : *r* = *discount rate* = *interest rate* + *inflation rate*

n = masa investasi PV (tahun)

t = tahun yang akan dihitung (tahun)

S = nilai investasi awal

NCF_t = pendapatan bersih hingga tahun ke-*n*

E. Rasio Penggunaan Lahan (LER)

Penggunaan lahan yang sama pada APV memiliki dampak terhadap kelayakan sistem. LER membandingkan secara konvensional penggunaan lahan energi dan pertanian yang terpisah terhadap integrasi pada lahan yang sama [14]. LER dapat dihitung dengan :

$$LER = \frac{Y_{agri-APV}}{Y_{agri}} + \frac{Y_{APV}}{Y_{PV}} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

Y_{agri} = panen satu tahun per hektar (kg/ha)

Y_{agri-APV} = panen lahan integrasi (kg/ha)

Y_{APV} = produksi energi terintegrasi (KWh/y)

Y_{PV} = produksi energi lahan tunggal (KWh/y)

F. Perhitungan pengurangan keseimbangan karbon

Penggunaan PLTS diharapkan dapat mengurangi emisi karbondioksida CO₂. Listrik yang dihasilkan PLTS dapat menggantikan jumlah energi listrik yang disalurkan pada jaringan yang sama.

$$Cb = E \text{ grid} \times \text{umur proyek} \times LCC \text{ grid} - LCC \text{ PLTS} \quad (2.19)$$

$$LCC \text{ system} = E_{grid} \times EF \times \text{umur proyek} \quad (2.20)$$

Keterangan :

Cb = pengurangan emisi

LCC grid = rata-rata CO₂ dari jaringan grid (0,734 kg CO₂/ kWh berdasarkan IEA negara Indonesia)
LCC PLTS = emisi dari PLTS
EF = faktor emisi PLTS (0,05 kg CO₂/ kWh berdasarkan Indonesia Environment & Energy Center)

METODOLOGI

A. *Objek Penelitian*

Objek penelitian yaitu Tegal Anggur yang merupakan tempat budidaya anggur impor dengan sistem teralis. Tegal Anggur berada di lokasi Kaligayam, Kecamatan Talang, Kabupaten Tegal dengan koodinat -6.908636325687454 LS, 109.13774224361443 BT. Luas tempat budidaya anggur 600 m²



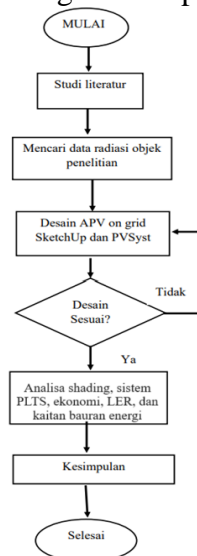
Gambar 3.1 Objek penelitian

B. *Perancangan sistem PLTS*

Proses perancangan PLTS yang dilakukan dengan mengumpulkan data seperti data radiasi matahari lokasi objek penelitian, jarak tanam anggur dan tinggi maksimum tersier anggur. Hal ini perlu diketahui untuk menentukan konstruksi dan jarak antar kolom PV agar pemanfaatan cahaya matahari optimum.

Sketchup digunakan untuk desain konstruksi dan mengetahui shading yang dihasilkan PV. Maksimum Panel PV dapat diketahui berdasarkan desain yang digunakan dan sebagai pertimbangan untuk optimasi sistem PLTS yang akan disimulasikan pada software simulasi PVsyst. Perhitungan keseluruhan biaya PLTS dan hasil simulasi digunakan untuk analisa nilai ekonomi dan rasio penggunaan lahan (LER) serta analisa terhadap bauran energi 2030 di Indonesia.

Proses alur perancangan dijelaskan pada diagram alir pada gambar 3.1



Gambar 3.1 diagram alir perancangan PLTS

HASIL DAN PEMBAHASAN**A. Perancangan Sistem PLTS**

Perancangan sistem PLTS dari luasan 600 m² (60m x10 m) lahan budidaya yang terdiri dari 5 kolom hanya diambil 3 kolom untuk sistem PLTS. Tujuan dari pengambilan 3 kolom adalah agar cahaya matahari masih dapat mencapai tanaman anggur. Setiap kolom terdiri dari luasan 2m x 60m yang kemudian dibagi dengan panjang dan lebar panel sesuai data pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Spesifikasi panel surya yang digunakan

<i>Nominal Max. Power (Pmax)</i>	550 W
<i>Opt. Operating Voltage (Vmp)</i>	41.55 V
<i>Opt. Operating Current (Imp)</i>	13,24 A
<i>Open Circuit Voltage (Voc)</i>	49,59 V
<i>Short Circuit Current (Isc)</i>	13,82 A
<i>Module Efficiency</i>	21,29%
<i>Max. System Voltage</i>	1500V or 1000V
<i>Max. Series Fuse Rating</i>	25 A
<i>Dimensi (p x l x t)</i>	2278 mm x 1134 mm x 35 mm

1. Perhitungan jumlah panel

Perhitungan jumlah panel adalah sebagai berikut :

a. Jumlah panel maksimum per kolom = $(60\text{m}/2,278\text{m}) \times (2\text{m}/1,134\text{ m})$

Jumlah panel maksimum per kolom= 26 x 1

b. Jumlah panel maksimum keseluruhan adalah 26 x 3 yaitu 78 panel

2. Penentuan kapasitas terpasang dan inverter

Tabel 4.2 Spesifikasi inverter 36 kW

max input voltage	1100 VDC
max input current	4*32 A
MPPT	4
MPPT Volt range	200-1000 V
Nominal output	36 kW
max efficiency	98,8 %

Jumlah maksimum 78 panel dikalikan daya nominal panel (550Wp) adalah 42900Wp. Hasil tersebut dibagi rasio panel banding kapasitas inverter yaitu 1,1:1 adalah 39000 Wp, sedangkan inverter yang tersedia adalah 36 kW dan 40 kW. Inverter 36kW dipilih dengan panel terpasang yaitu 36kW x 1,1 adalah 72 panel.

3. Penentuan kombinasi rangkaian ke inverter.

Kombinasi rangkaian dari jumlah panel dan inverter menurut data tabel 4.1 dan 4.2 dilakukan dengan:

$$\text{Min seri per string} = \frac{200}{41,55} = 4,8 \text{ dibulatkan } 5$$

$$\text{Max seri per string} = \frac{1000}{49,59} = 20,16 \text{ dibulatkan } 20$$

$$\text{Max paralel per string} = \frac{32}{13,24} = 2,3 \text{ dibulatkan } 2$$

Dari perhitungan diatas diambil rangkaian 4 string dengan 18 rangkaian seri tiap string yang masuk ke MPPT yang sesuai jumlah yang ada di inverter.

4. Perhitungan daya yang dihasilkan sistem PLTS

Perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{a. } P_{\text{Modul}} &= \text{Luas panel} \times \text{PSI} \times \eta_{\text{pv}} \\ &= 2,278 \text{ m} \times 1,134 \text{ m} \times 1000 \text{ W/m}^2 \times 21,29\% \\ &= 549,97 \text{ W} \end{aligned}$$

b. Penentuan rugi- rugi sistem yang diambil dari tabel 4.3

Tabel 4.3 Rugi-rugi sistem perancangan

Faktor rugi-rugi	Nilai rugi
Kotoran (debu, plak, kotoran burung)	3%
Perbedaan kinerja antar panel	3%
Penurunan daya akibat pengkabelan	5%
Efisiensi inverter	1,2%
Beda Uji standart tes normal (STC) dan standar Uji PVUSA (PTC)	3%
Perubahan temperature	5%
Total	20,2%

$$\begin{aligned} \text{c. Daya modul} &= P_{\text{modul}} \times (100\% - \text{total rugi-rugi}) \\ &= 549,97 \text{ W} \times (100\% - 20,2\%) \\ \text{Daya modul} &= 438,876 \text{ W} \end{aligned}$$

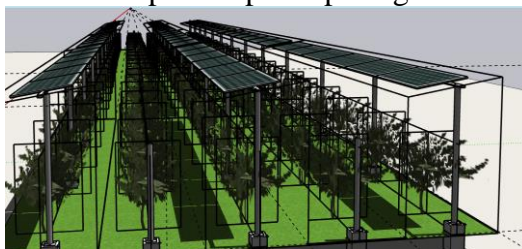
$$\begin{aligned} \text{d. Daya kapasitas terpasang} &= \text{Daya modul} \times \text{jumlah panel} \\ &= 438,876 \text{ W} \times 72 \\ &= 31.599,072 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{e. PSH} &= \frac{\text{radiasi matahari} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \\ &= \frac{152,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} / \text{bulan}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} : 31 (\text{Januari}) \\ &= 4,919 \text{ jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{f. Eoutput} &= \text{Daya kapasitas terpasang} \times \text{PSH} \\ &= 31.599,072 \times 4,919 \\ &= 155.435,835 \text{ W} \end{aligned}$$

B. Hasil perancangan dengan SketchUp

Hasil perancangan dengan SketchUp ditampilkan pada gambar 4.1.

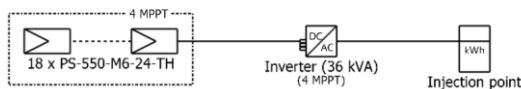


Gambar 4.1 Hasil perancangan dengan Sketchup

Bayangan panel menutupi cahaya langsung matahari ke tanaman anggur yang tepat dibawahnya pada bulan Maret dan September. Pergerakan cahaya matahari dari pagi ke sore, tanaman anggur masih mendapatkan sinar matahari. Pematangan cabang anggur bisa dilakukan 2-3 minggu sebelum bulan Maret dan September agar klaster bunga dapat terlindungi dari panas berlebih yang menyebabkan keringnya klaster bunga. Penggunaan mulsa perak dapat ditambahkan untuk memberikan efek penyebaran cahaya matahari.

C. Simulasi PVSyst

Simulasi PVSyst dilakukan dengan input dari hasil perhitungan perancangan dengan panel surya 550 Wp sebanyak 72 dengan inverter 36 kW. Single line diagram ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Single line diagram simulasi on grid

D. Hasil Perhitungan dan Simulasi

Hasil Perhitungan dan simulasi daya yang dihasilkan sistem PLTS disajikan dalam tabel 4.4. Perhitungan dalam 1 tahun sebesar 59037,178 kWh. Simulasi menghasilkan daya sebesar 62385 kWh per tahun. Perbedaan perhitungan dan simulasi adalah 5,39 % dari hasil daya yang dihasilkan dalam 1 tahun. Tabel 4.3 merupakan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan dan simulasi

Bulan	GlobHor (kWh/m ²)	E hitung (kWh)	E PVSyst (kWh)
1	152,5	4.818,51	4.727
2	146,4	4.625,60	4.683
3	158,9	5.020,30	5.267
4	155,9	4.925,66	5.337
5	151,3	4.781,29	5.359
6	144,9	4.578,71	5.262
7	151,2	4.777,37	5.445
8	160,6	5.075,16	5.610
9	159,7	5.046,06	5.340
10	175,6	5.549,27	5.658
11	154,9	4.894,38	4.863
12	156,5	4.944,88	4.824
Tahun	1868,3	59.037,18	62.385

E. Aspek pembiayaan sistem

Aspek pembiayaan sistem dari perancangan PLTS ditampilkan dalam tabel 4.5.

Tabel 4.5 Aspek pembiayaan sistem

Aspek sistem	Pembiayaan	Nilai
Total investasi + PPN		Rp 366.500.000,00
Operasi dan pemeliharaan (O&M)		Rp 3.665.000,00
Siklus hidup (LCC)		Rp 507.925.000,00
Nilai sekarang biaya pengeluaran tetap (P)		Rp 58.640.000,00
Faktor diskonto (DF)		0,2329
Faktor pemulihan modal (CRF)		0,0815
Biaya energi perhitungan (COE)		Rp 701,05/kWh
Biaya energi simulasi (COE)		Rp 663,564/kWh

Biaya pembangkitan tersebut jika dibandingkan dengan biaya pembangkitan dari PLTU batu bara sekitar Rp 737,35/kWh (Laporan Statistik PLN 2022) untuk perhitungan selisih Rp 36,30 lebih murah untuk PLTS. Simulasi dari hasil pembangkitan memiliki selisih Rp 73,79 lebih murah dari biaya pembangkitan PLTU batu bara yang telah dibantu kebijakan DMO (penjualan batu bara dalam negeri) sebesar 70 USD/ ton.

F. Analisa Ekonomi

Perhitungan kebutuhan produksi anggur selama setahun meliputi pupuk, pencegahan penyakit dengan fungisida dan insektisida serta kebutuhan lainnya berdasarkan tabel 2.1 sebesar Rp 1.750.000,00.

Prediksi panen anggur dengan asumsi Panjang sekunder anggur adalah 2 meter dan jarak kolom 1,8 meter maka jumlah pohon anggur 150 pohon

$$PY = (NV \times NC \times CW) / 2000$$

$$PY = (1210 \times 30 \times 0,35) / 2000$$

$$PY = 6,3525 \text{ ton untuk satu acre}$$

Keterangan: satu acre dengan jarak tanam 2 m dan jarak kolom 1,8 m banyaknya pohon anggur adalah 1210 pohon.

Hasil prediksi panen dikalikan 150/1210 untuk lahan dan dikalikan 2 karena dapat dilakukan pemanenan 2 kali dalam 1 tahun

$$PY \text{ lahan} = \frac{150}{1210} \times 6,3525 \times 2$$

$$= 1,575 \text{ ton}$$

Prediksi panen dengan adanya PLTS yang terintegrasi terdapat potensi pengurangan cabang tersier di sekitar tiang penyangga. Banyaknya pengurangan cabang diameter tiang dikalikan banyaknya tiang adalah 10cm x 45 tiang atau sebesar 450 cm, dengan jarak tanam adalah 2m maka terdapat pengurangan sekitar 3 pohon anggur. Prediksi panen dapat dihitung dengan mengurangi nilai NV (banyaknya pohon anggur).

$$\begin{aligned} \text{PY terintegrasi PLTS} &= \frac{147}{1210} \times 6,3525 \times 2 \\ &= 1,5435 \end{aligned}$$

Jika harga anggur Rp 30.000,00 per kg dan dijual akan mendapatkan hasil Rp 47.250.000,00 per tahun. Hasil tersebut dikurangi kebutuhan per tahun sebesar Rp 1.750.000,00 dan biaya pengelolaan lahan budidaya sebesar gaji umk Kabupaten Tegal sebesar Rp2.191.161,00 dibulatkan ke Rp2.200.000,00. Maka masih ada keuntungan bersih sebesar Rp18.155.000,00.

Harga jual listrik PLTS adalah 11,47 cent/kWh x F untuk tahun pertama sampai 10 tahun dan untuk tahun 11-30 tahun turun jadi 6,88 cent/kWh (Perpres nomor 112 tahun 2022 tentang percepatan EBT untuk penyedia tenaga listrik). Faktor wilayah (F) di Jawa, Madura, dan Bali adalah 1.

Perhitungan nilai ekonomi sistem ditampilkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai ekonomi sistem PLTS dan budidaya anggur

Parameter	Nilai
Pendapatan perhitungan (10 tahun awal)	Rp 105.444.345,53 per tahun
Pendapatan perhitungan (11-25 tahun)	Rp 62.964.966,39 per tahun
Pendapatan simulasi (10 tahun awal)	Rp 111.604.507,95 per tahun
Pendapatan simulasi (11-25 tahun)	Rp 66.725.362,80 per tahun
PBXperhitungan	3,42 tahun
PBX perhitungan + budidaya anggur	2,92 tahun
PBX simulasi	3,23 tahun
PBX simulasi + budidaya anggur	2,78 tahun
NPV perhitungan	Rp 650.180.976,56
NPV perhitungan + budidaya anggur	Rp 857.622.428,82
NPV simulasi	Rp 708.787.665,21
NPV simulasi + budidaya anggur	Rp 916.229.117,47

Hasil payback period yang dibawah 4 tahun dan NPV yang bernilai positif dinilai layak. NPV gabungan PLTS dan budidaya anggur terintegrasi lebih besar dibandingkan proyek PLTS tunggal.

G. Rasio penggunaan lahan

Potensi pembangkitan PLTS dari perhitungan menghasilkan 59.049,186 kWh. Sedangkan dalam luasan 600 m² dapat dipasang panel sebanyak 60 m:2,278 m yaitu 26 panel dikali 10m :1,134 m yaitu 8 panel dengan total panel adalah 208 panel. Jumlah tersebut dikurangi untuk jarak antar panel maka banyaknya panel terpasang 200 panel.

$$\begin{aligned} \text{a. Daya kapasitas terpasang} &= 438,876 \text{ W} \times 200 \\ &= 87775,2 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. YPV} &= 87775,2 \times \text{PSH} \times 365 \\ &= 87775,2 \times 4,919 \times 365 \\ &= 157594666,21 \text{ W} \\ &= 157594,666 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c. LER} &= \frac{Y_{agri-APV}}{Y_{agri}} + \frac{Y_{APV}}{Y_{PV}} \\ &= \frac{1543,5 \text{ kg}}{1575 \text{ kg}} + \frac{59049,186 \text{ kWh}}{157594,666 \text{ kWh}} \\ &= 1,354 \end{aligned}$$

Nilai rasio penggunaan lahan adalah 1,354. Nilai tersebut memiliki efektifitas penggunaan lahan yang lebih besar dibandingkan penggunaan lahan tunggal untuk PLTS maupun budidaya anggur.

H. Potensi PLTS pada lahan budidaya anggur terhadap bauran energi 2030

Perencanaan PLTS di Indonesia berdasarkan RKUEN 2021-2030 adalah 26.650 MW untuk PLTS terapung dan PLTS sekala besar sebesar 4.480 MW sampai 2030 dan untuk PLTS atap melalui SK Dirjen Ketenagalistrikan Kementerian ESDM Nomor 279.K/TL.03/DJL.2/2024 adalah sebesar 5.746 MW sampai 2028. Total perencanaan PLTS di Indonesia yaitu 36.867 MW. Kapasitas perencanaan terpasang 39,6 kW dapat menyumbang sebesar $1,074 \times 10^{-6}$ dari total kapasitas terpasang atau sekitar 0,0001074% dari total perencanaan PLTS di Indonesia untuk 2030.

I. Pengurangan emisi karbondioksida

Perhitungan pengurangan emisi CO₂ adalah:

$$\begin{aligned} \text{1. LCC system} &= \text{Egrid} \times \text{EF} \times \text{umur proyek} \\ &= 59.049,182 \text{ kWh} \times 0,05 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \times 25 \\ &= 73.811,4775 \text{ kg CO}_2 \\ &= 73,812 \text{ t CO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2. Cb} &= \text{E grid} \times \text{umur proyek} \times \text{LCC grid} - \text{LCC PLTS} \\ &= 59.049,182 \times 25 \times 0,734 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} - 73,812 \text{ t CO}_2 \\ &= 1.083.552,489 \text{ kg CO}_2 - 73,812 \text{ t CO}_2 \\ &= 1.009,741 \text{ t CO}_2 \end{aligned}$$

Pengurangan emisi CO₂ dari sistem PLTS yaitu 1.009,741 t CO₂.

KESIMPULAN

Perancangan yang dilakukan menghasilkan sistem PLTS dengan kapasitas terpasang 39,6 kWp dengan inverter 36 kWh. Potensi pembangkitan dari perhitungan adalah 59.049,186 kWh pertahun. Simulasi menggunakan PVSyst menghasilkan daya sebesar 62.358 kWh pertahun. Perbedaan antara hasil perhitungan dan simulasi sebesar 5,35%. Biaya pembangkitan dari perancangan sistem PLTS yakni Rp 689,83/kWh untuk perhitungan dan Rp 652,94/kWh untuk simulasi. Lebih murah dibandingkan dengan biaya pembangkitan PLTU batu bara yaitu Rp 737,52 per kWh. Nilai ekonomi sistem yang dibuat menghasilkan hasil positif dengan *payback periode* gabungan selama 2,78 sampai 2,92 tahun, dan NPV gabungan bernilai Rp 857.622.428,82 dari hasil perhitungan dan Rp 916.229.117,47 dari nilai simulasi. Rasio penggunaan lahan untuk PLTS di lahan budidaya anggur sebesar 1,354. Kapasitas perencanaan terpasang 39,6 kW dapat menyumbang sebesar 0,0001074 % dari total perencanaan PLTS di Indonesia untuk 2030. Perencanaan PLTS yang dilakukan mampu mengurangi emisi CO₂ sebesar 1.009,741 t CO₂.

REFERENCES

- [1] I. Nawawi, A. A. Kurniawan and D. Pravitasari, "Acceleration of Rooftop Solar Power Plant Development as a Support of the Reduction of Greenhouse Effect," 2022 International Conference on Informatics Electrical and Electronics (ICIEE), Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEE55596.2022.10010075.
- [2] Fraunhofer, I. S. E. (2020). Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition: A Guideline for Germany. Fraunhofer ISE: Freiburg im Breisgau, Germany.
- [3] Beck, M. & Bopp, Georg & Goetzberger, Adolf & Obergfell, Tabea & Reise, Christian & Schindele, Stephan. (2012). Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic? Optimization of Orientation and Harvest. 10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2.25.
- [4] Cho, Jaiyoung, Sung Min Park, A Reum Park, On Chan Lee, Geemoon Nam, and In-Ho Ra. 2020. "Application of Photovoltaic Systems for Agriculture: A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture" *Energies* 13, no. 18: 4815. <https://doi.org/10.3390/en13184815>
- [5] S. Y. Ahn et al., "Grapevine Growth and Berry Development under the Agrivoltaic Solar Panels in the Vineyards," *Journal of Bio-Environment Control*, vol. 31, no. 4. The Korean Society for Bio-Environment Control, pp. 356–365, 31-Oct-2022.
- [6] Malu, Prannay & Sharma, Utkarsh & Pearce, Joshua. (2017). Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 23. 104-110. 10.1016/j.seta.2017.08.004.
- [7] Padilla J, Toledo C and Abad J (2022), Enovoltaics: Symbiotic integration of photovoltaics in vineyards. *Front. Energy Res.* 10:1007383. doi: 10.3389/fenrg.2022.1007383
- [8] Sullivan, M. (2016). *Solar Rooftop DIY: The Homeowner's Guide to Installing Your Own Photovoltaic Energy System (Countryman Know How)*. The Countryman Press.
- [9] Creasy, G. L., & Creasy, L. L. (2008). *Grapes Crop Production Science in Horticulture series (Ser. 16)*. CABI.
- [10] Dufourcq, T., Lopez, F., Thomas, A., Feilhes, Vergnes and Carole D. (2022). Effect of partial net shading on the temperature and radiation in the grapevine canopy, consequences on the grape quality of cv. Gros Manseng in PDO Pacherenc-du-vic-Bilh. *IVES Conference Series, Terclim 2022*.
- [11] Ayatullah, Leghari S.K., Shaukat K, Khattak M.I., Panezai, M.A., Marri, A.A., Ismail. T., Shagufta(2019). Influence of sun and shade on the growth, yield and quality of *Vitis vinifera* L. (grapes) under semiarid environmental conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4).https://doi.org/10.15666/aeer/1704_88478864
- [12] Zha, Q., Xi, X., Yin, X., He, Y., & Jiang, A. (2021). Colored shade nets can relieve abnormal fruitsoftening and premature leaf senescence of "Jumeigui" grapes during ripening undergreenhouse conditions. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-902508/v1>
- [13] Zizlavsky, Ondrej. (2014). Net Present Value Approach: Method for Economic Assessment of Innovation Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 156. 10.1016/j.sbspro.2014.11.230 .
- [14] Toledo, C., Scognamiglio, A., 2021, Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns), *Sustainability* 2021, 13, 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>