

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Penelitian mengenai pemanfaatan energi terbarukan, khususnya tenaga surya, telah banyak dilakukan baik di tingkat nasional maupun internasional. Kajian terdahulu menjadi dasar penting dalam memberikan gambaran mengenai potensi, tantangan, serta kelayakan dari pengembangan teknologi *Floating Solar Photovoltaic (Floating Solar PV)*.

Energi surya kini menjadi salah satu pilar utama dalam peralihan menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Biaya teknologinya terus menurun—lebih dari 80 persen dalam dekade terakhir—sehingga semakin kompetitif secara ekonomi [4]. Energi surya di Indonesia diperkirakan memiliki kapasitas teknis lebih dari 200 GW ketika memanfaatkan teknologi *photovoltaic* yang tersedia saat ini. Akan tetapi, realisasi pemanfaatannya dalam sektor pembangkitan listrik masih sangat terbatas sedangkan sumber daya surya tersebut tersebar secara luas di berbagai wilayah Indonesia [5].

Studi mengenai *techno-economic feasibility* proyek *Floating Solar PV* di Indonesia menggunakan perangkat lunak RETScreen hasil penelitian menunjukkan bahwa proyek tersebut layak secara teknis dan ekonomis, serta mampu memberikan kontribusi dalam diversifikasi energi nasional dan pengurangan emisi karbon [6].

Pada penelitian yang dilakukan Ardianti *et al.* merancang *Floating Photovoltaic (FPV)* 48 MW di Danau Singkarak menggunakan PVsyst dan DIGSILENT. Hasilnya, sistem dengan 96.000 modul surya dan 16 inverter ini layak diintegrasikan ke jaringan melalui Gardu Induk Solok karena menghasilkan energi optimal, rugi daya rendah, serta nilai THDv 2,14% yang masih sesuai standar IEEE[7].

Studi lainnya tentang *Floating Solar Photovoltaic (FPV)* berkapasitas 100 kWp di Waduk Muara Nusa Dua, Bali telah dianalisis secara *techno-economic*, dengan hasil produksi energi tahunan sebesar 145,93 MWh dan estimasi pendapatan sekitar Rp236 juta per tahun 2. Dari perspektif finansial, sistem ini menunjukkan kelayakan investasi dengan nilai *Net Present Value (NPV)* sebesar Rp2,81 miliar, *Internal Rate of Return (IRR)* sebesar 5,73%, serta *payback period* selama 13 tahun 2. Selain itu, instalasi FPV tersebut mampu menurunkan emisi CO₂ sekitar 103 ton

per tahun sehingga dinilai layak untuk mendukung peningkatan bauran energi terbarukan di wilayah Bali [8].

Literature review terhadap lebih dari 900 publikasi terkait *Floating Solar PV* (FPV). Hasilnya menunjukkan bahwa nilai *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) FPV telah turun hingga 0,05–0,07 USD/kWh sehingga semakin kompetitif dibanding pembangkit konvensional [9].

Selain kajian teknis-ekonomis, penelitian lain juga membahas pendekatan *Sustainable ROI* dan *Social Return on Investment* (SROI) dalam menilai keberlanjutan proyek energi dan sosial. Dalam penelitiannya memperkenalkan konsep *Sustainable ROI* sebagai indikator kelayakan investasi energi terbarukan dengan studi kasus PLTS di Siprus, dan membuktikan bahwa ROI berkelanjutan dapat menjadi alat ukur penting bagi investasi jangka Panjang [10].

Sebuah proyek CSR berbasis energi terbarukan di Thailand dinilai dengan memantau kinerja sosial, ekonomi, dan lingkungan, dan hasilnya menunjukkan dampak positif terhadap kesejahteraan masyarakat serta keberlanjutan lingkungan [11]. Penelitian di Indonesia juga menunjukkan hasil serupa, pada kasus program CSR PLTGU Cilegon berupa pemberdayaan kelompok jahit yang menghasilkan NPV Rp1,988 miliar, IRR 109%, serta SROI 20,39, dan memberikan kontribusi terhadap pencapaian SDGs [12]. Program CSR pada proyek pabrik briket batubara untuk peternakan ayam potong oleh PT Berau Coal memiliki SROI sebesar 27,03, sehingga sangat layak secara sosial dan finansial [13].

Lebih lanjut, pada program Trenggulungan Agro View (TAV) disekitar PLTU Rembang yang mengintegrasikan pemberdayaan masyarakat, pemanfaatan limbah FABA, dan *co-firing* biomassa, program ini menghasilkan SROI 2,23 dengan dampak nyata berupa peningkatan pendapatan masyarakat sebesar 128,5% dan penurunan angka kemiskinan sebesar 31% [14]. Di Eropa, sebuah metode SROI diterapkan pada proyek rehabilitasi ruang kota berbasis *Nature-Based Solutions* (NBS) dalam kerangka VARCITIES dan menemukan bahwa intervensi NBS meningkatkan kualitas lingkungan sekaligus memperkuat keterlibatan sosial masyarakat [15].

Dengan demikian, berbagai penelitian terdahulu baik mengenai *Floating Solar PV* (FPV) maupun penerapan SROI menunjukkan bahwa teknologi ini tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi bersih, sekaligus memberikan manfaat sosial-lingkungan yang signifikan. Temuan-temuan tersebut menjadi landasan penting bagi penelitian ini untuk menganalisis kelayakan teknis, ekonomis, dan sosial dari pengembangan *Floating Solar PV* di lokasi studi.

Tabel 2.1 Matriks Penelitian Sebelumnya

No	Judul	Konteks	Metode	Hasil Utama
1	Laporan Status Energi Bersih Indonesia [5]	Potensi energi surya nasional	Laporan potensi energi	Potensi energi surya >200 GWp, pemanfaatan rendah
2	<i>Techno-Economic Feasibility Floating Solar PV</i> Indonesia [6]	Analisis FPV dengan RETScreen	RETScreen techno-economic	Proyek FPV layak secara teknis & ekonomis, kurangi emisi
3	<i>Floating PV</i> 48 MW Danau Singkarak [7]	Desain FPV 48 MW di Sumatera Barat	PVsyst + DiGSILENT	96.000 modul, 16 inverter, THDv 2,14% sesuai standar IEEE
4	<i>Floating Solar PV</i> 100 kWp Muara Nusa Dua [8]	Analisis techno-economic FPV Bali	Simulasi produksi energi & finansial	Produksi 145,93 MWh/tahun, NPV Rp2,81 miliar, IRR 5,73%, CO ₂ berkurang 103 ton/tahun
5	<i>Review</i> 900 publikasi FPV [9]	Tinjauan global literatur FPV	Literature review >900 publikasi	LCOE FPV turun 0,05–0,07 USD/kWh, makin kompetitif
6	<i>Sustainable ROI as an indicator of renewable energy investments</i> [10]	Investasi PLTS di Siprus	Studi kasus, Sustainable ROI	ROI berkelanjutan valid untuk investasi PLTS
7	<i>Evaluation of CSR Project in Thailand</i> [11]	CSR energi terbarukan Thailand	Monitoring kinerja CSR	Dampak sosial, ekonomi, lingkungan positif
9	CSR Program SROI Analysis: PT PLN PLTGU Cilegon [12]	Program kelompok jahit Margasari	Capital budgeting + SROI	NPV Rp1,988M, IRR 109%, kontribusi SDGs
10	<i>SROI of Coal Briquette Processing Plant CSR PT Berau Coal</i> [13]	Pabrik briket batubara & peternakan	Capital budgeting + SROI	NPV positif, IRR 40%-228%
11	<i>SROI in Community Empowerment Program - PLTU Rembang</i> [14]	Agro View: CSR & co-firing biomassa	SROI, wawancara stakeholder	Pendapatan naik 128,5%, kemiskinan turun 31%
12	<i>SROI for Urban Rehabilitation Projects</i> [15]	Proyek NBS di kota-kota Eropa	SROI + CBA perbandingan	NBS tingkatkan kualitas lingkungan & partisipasi sosial

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem yang memanfaatkan modul fotovoltaik (PV) untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Berdasarkan proyeksi IEA, pangsa pembangkitan listrik dari teknologi Solar PV menunjukkan peningkatan paling signifikan di

antara sumber energi terbarukan, mengalami pertumbuhan progresif sejak awal 2000-an dan diperkirakan terus mendominasi ekspansi kapasitas terbarukan hingga 2030, melampaui kontribusi energi angin, hidro, maupun bioenergi dalam bauran pembangkitan global [16].

PLTS pada dasarnya terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu PLTS *on-grid* dan PLTS *off-grid*. PLTS *on-grid* dihubungkan langsung ke jaringan listrik sehingga dapat menyalurkan energi secara luas. Sementara itu, PLTS *off-grid* biasanya dipasang di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik dengan dukungan sistem penyimpanan energi menggunakan baterai [17].

Perkembangan teknologi PV juga semakin pesat, baik dari sisi efisiensi modul, desain sistem, maupun integrasi dengan teknologi lain. Misalnya, sistem PLTS terapung (*Floating PV*) memiliki keunggulan berupa efek pendinginan alami dari air yang dapat meningkatkan efisiensi produksi listrik sekaligus menurunkan biaya operasi [18]. Selain itu, penerapan PLTS terapung di Indonesia berpotensi besar sebagai solusi kebutuhan energi bersih di pulau-pulau, dengan tetap memperhatikan faktor teknis dan sosial [19]. Dengan perkembangan tersebut, PLTS dipandang sebagai salah satu solusi strategis dalam mendukung transisi energi bersih dan pencapaian target *Net Zero Emission* di Indonesia pada tahun 2060.

Dalam sebuah perencanaan PLTS, banyaknya panel surya yang dibutuhkan dapat ditentukan tergantung pada besar daya yang akan dibangkitkan (*wattpeak*) menggunakan rumus [20]:

$$\text{Jumlah modul} = \frac{P_{(\text{watt peak})}}{P_{\text{Maks}}} [\text{Unit}] \quad (2.1)$$

Dimana:

$P_{\text{watt peak}}$ = Daya yang dibangkitkan [W_p]

P_{Maks} = Daya *output* maksimum panel surya [watt]

$$\text{Luas lahan} = \text{Jumlah modul} \times \text{luas panel} \quad (2.2)$$

Menurut evaluasi yang dilakukan oleh National Renewable Energy Laboratory (NREL), tingkat kerapatan penempatan modul fotovoltaik—atau *packing factor*—menunjukkan variasi yang sangat besar pada berbagai konfigurasi sistem. Nilai PF yang diamati di lapangan berkisar antara 13% hingga 92%, sementara untuk sistem fixed-tilt diperoleh rata-rata kapasitas-terbobot sebesar 47%. NREL juga mencatat bahwa studi sebelumnya melaporkan kisaran PF yang lebih umum antara 20% hingga 67% [21]. Berdasarkan rentang tersebut, penggunaan nilai *packing factor* 0,60 menjadi

acuan atau asumsi dalam penelitian ini. Dengan menggunakan rumus di bawah ini maka estimasi energi listrik tahunan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [22]:

$$E = P_{pv} \times H \times PR \quad (2.3)$$

Dimana:

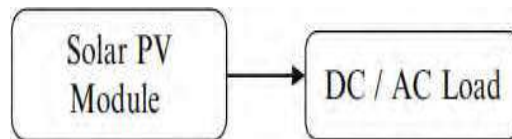
E = energi listrik tahunan (kWh/tahun)

P_{pv} = kapasitas terpasang sistem PLTS (kWp)

H = rata-rata radiasi surya tahunan di lokasi (kWh/m²/tahun)

PR = *performance ratio* (rasio kinerja, tanpa satuan)

Dalam sistem PLTS, sel surya dapat dikoneksikan dengan beberapa konfigurasi untuk mencapai spesifikasi yang diinginkan. Jika panel dihubungkan secara seri, maka tegangan total akan meningkat sesuai jumlah sel, sedangkan pada sambungan paralel yang meningkat adalah arusnya. Pada PLTS off-grid, sistem dirancang untuk menyuplai beban DC maupun AC. Konfigurasi ini dikenal sebagai *direct-coupled system* karena keluaran DC dari modul atau *array* PV langsung terhubung ke beban DC tanpa penyimpanan energi (baterai). Akibatnya, beban hanya dapat beroperasi ketika ada radiasi matahari. Untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan, digunakan *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* sebagai penghubung antara *array* PV dan beban. Diagram blok sistem PLTS *off-grid direct coupled* dapat dilihat pada gambar di bawah ini [23].



Gambar 2.1 Diagram blok sistem PLTS *direct coupled* [23]

2.3 Ash Pond

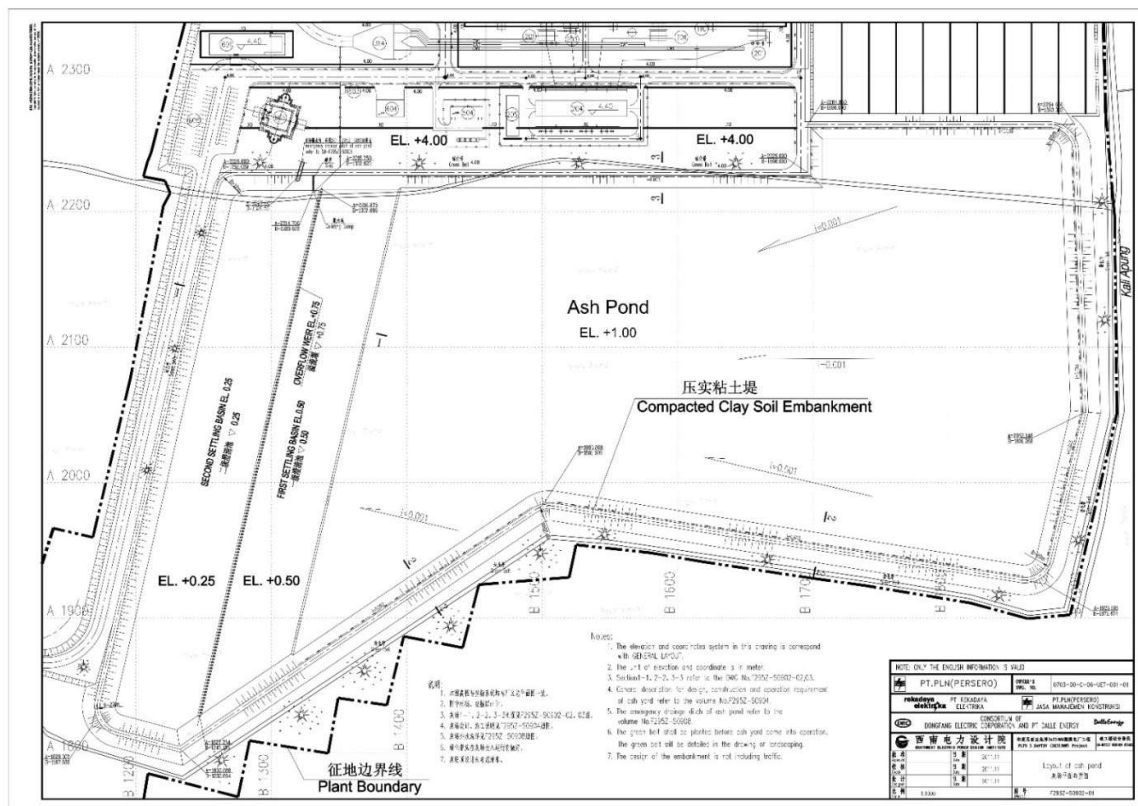
Ash pond atau kolam abu adalah fasilitas penampungan yang digunakan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara untuk menampung sisa pembakaran berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Limbah tersebut dialirkan dalam bentuk *slurry* (campuran padat dan cair) menuju area kolam yang didesain khusus untuk mengendapkan partikel padat, sementara airnya dapat diolah kembali atau dibiarkan menguap [24].

Keberadaan *ash pond* seringkali menimbulkan masalah lingkungan, pelepasan logam dari *fly ash* dalam kolam abu batubara memiliki potensi dampak negatif terhadap lingkungan akibat konsentrasi logam yang tinggi dalam abu jika penanganan dan pembuangan tidak tepat [25]. Oleh

karena itu, pengelolaan ash pond harus dilakukan dengan teknologi yang memadai agar aman terhadap lingkungan.

Di sisi lain, area permukaan *ash pond* yang luas dan biasanya tidak dimanfaatkan kembali secara langsung dapat dijadikan alternatif lokasi pemasangan *Floating Solar PV*. Pemanfaatan ini memiliki dua keuntungan utama: pertama, mengurangi lahan darat yang dibutuhkan untuk pembangunan PLTS; kedua, meningkatkan citra keberlanjutan dari PLTU yang sedang dalam transisi menuju energi lebih bersih [26].

PLTU Banten 3 Lontar sebagai pembangkit berbahan bakar batubara memiliki *ash pond* yang seluas 36.125 m² yang digunakan sebagai penampungan sementara sisa pembakaran yang berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) yang merupakan masuk dalam kategori limbah Non B3. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, limbah non B3 tidak diizinkan disimpan lebih dari 3 tahun sehingga harus dikelola lebih lanjut. Hal ini memberikan keuntungan dari segi pemanfaatan lahan yang tersedia cukup luas untuk dimanfaatkan, salah satu contohnya sebagai lahan *floating solar PV* atau pemasangan PLTS di atas permukaan *settling basin* pada area *ash pond* tersebut.



Gambar 2.2 Drawing Ash Pond Area PLTU Banten 3 Lontar

Kondisi saat ini sudah terinstal PLTS terapung atau *floating solar PV* di atas permukaan *settling basin ash pond* dengan daya terpasang 1 MWp dilahan seluas 6000 m². Luas area yang terpakai untuk instalasi *floating solar PV* 1 MWp baru hanya memanfaatkan lahan seluas 17% dari lahan yang tersedia. Luas area *settling basin ash pond* seluas 36.125 m², luas tersebut sudah dikurangi dengan luas area *shadding* bayangan pohon dipinggir *ash pond* dengan jarak 30 meter.

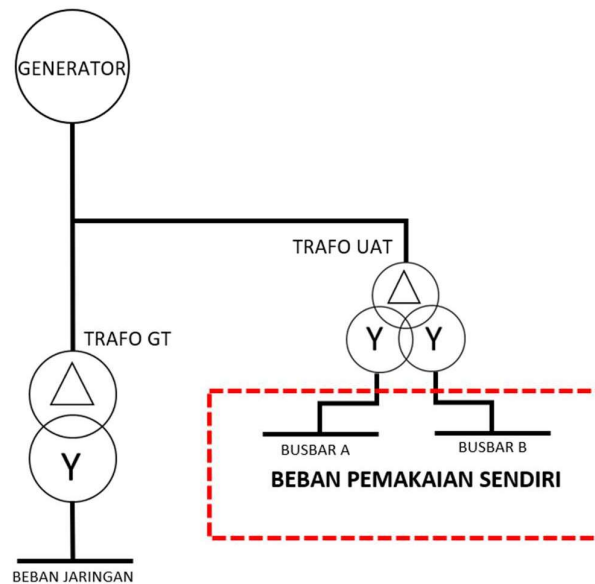
Hal ini memungkinkan untuk dikembangkan atau dilakukan penambahan kapasitas *floating solar PV* sehingga pemanfaatan lahan bisa dimaksimalkan. Estimasi penambahan daya terpasang yaitu sekitar 3 MWp, jadi total daya terpasang dimasa mendatang diharapkan menjadi 4 MWp.



Gambar 2.2 *Floating solar PV* 1 MWp di area *Ash Pond* PLTU Banten 3 Lontar

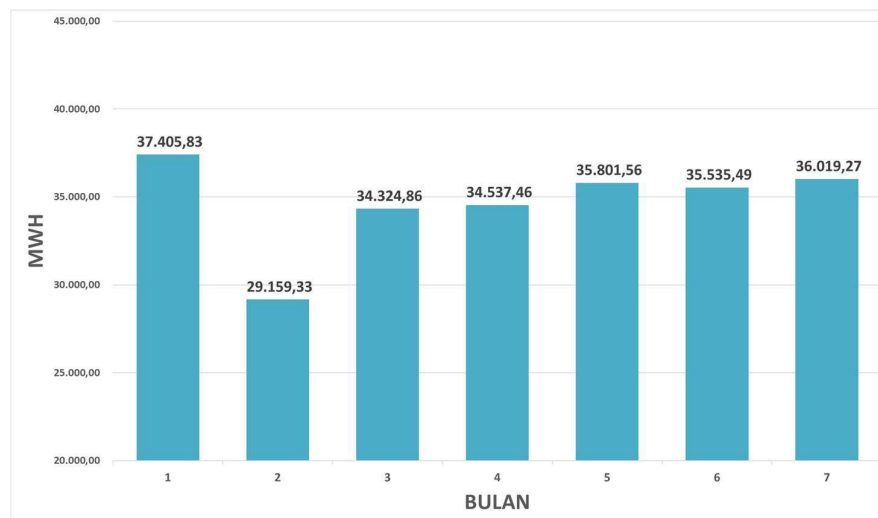
2.4 Pemakaian Listrik Sendiri (PS)

Pemakaian listrik sendiri atau *internal power consumption* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sejumlah energi listrik yang diproduksi pembangkit dan digunakan kembali untuk mengoperasikan peralatan penunjang di dalam sistem pembangkit itu sendiri. Listrik internal ini tidak disalurkan ke jaringan (*grid*), melainkan diperlukan agar proses konversi energi primer menjadi energi listrik dapat berlangsung secara kontinyu dan stabil.



Gambar 2.3 Konfigurasi Generator dan Transformator pada pembangkit

Kebutuhan listrik internal ini berpengaruh langsung terhadap *net capacity* atau daya bersih yang dapat disalurkan ke jaringan. Perbedaan antara energi listrik bruto (*gross generation*) dan energi listrik bersih (*net generation*) merupakan indikator seberapa besar konsumsi listrik internal pembangkit. Selain itu, tingkat pemakaian listrik sendiri juga menjadi salah satu indikator efisiensi operasional. Semakin rendah konsumsi listrik internal terhadap total produksi, semakin tinggi efisiensi pembangkit dalam menghasilkan energi bersih yang dapat dijual atau digunakan untuk kebutuhan eksternal. Konsumsi listrik internal pada PLTU Banten 3 Lontar rata-rata perbulan mencapai lebih dari 30.000 MWh atau sekitar 6% dari total produksi listrik yang dihasilkan.



Gambar 2.4 Realisasi Pemakaian Listrik Sendiri PLTU Banten 3 Lontar tahun 2025

Oleh karena itu, upaya efisiensi operasional seperti penggunaan peralatan berdaya tinggi dengan efisiensi lebih baik, pengaturan optimal beban pompa dan fan, serta integrasi energi terbarukan tambahan (misalnya PLTS atap atau *floating solar PV*) di area pembangkit menjadi salah satu strategi untuk menekan pemakaian listrik sendiri di PLTU.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang dikaji dalam penelitian ini dirancang dan dioperasikan dengan skema *on-grid* pada jaringan internal pemakaian listrik sendiri PLTU. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS tidak diekspor ke jaringan distribusi atau transmisi PLN, melainkan secara langsung digunakan untuk memenuhi beban internal pembangkit, seperti sistem bantu (*auxiliary system*), sehingga berfungsi sebagai sumber energi komplementer terhadap pasokan listrik utama PLTU.

2.5 Software PVsyst

PVsyst merupakan perangkat lunak yang banyak digunakan dalam analisis dan perancangan sistem fotovoltaik (PV). Software ini dikembangkan oleh *Université de Genève*, Swiss, dan telah menjadi standar internasional untuk simulasi performa sistem tenaga surya. PVsyst mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi energi surya, desain teknis sistem, hingga evaluasi kinerja, sehingga sangat bermanfaat untuk penelitian maupun implementasi proyek PLTS.



Gambar 2.5 *Software PVsyst* [27]

PVSyst digunakan untuk merancang serta menilai performa sistem tenaga surya. Aplikasi ini telah diadopsi secara luas di tingkat internasional sebagai alat analisis dalam perencanaan dan evaluasi kinerja sistem fotovoltaik. Proses simulasi pada PVSyst dilakukan berdasarkan data aktual per jam selama satu tahun penuh, sehingga memungkinkan penentuan konfigurasi yang optimal untuk menghasilkan energi tertinggi. Perhitungan ini mempertimbangkan radiasi global, kecepatan angin, dan suhu, yang diambil dari basis data parameter lingkungan dan data radiasi dalam periode tertentu [28].

Keunggulan utama PVsyst adalah kemampuannya dalam menampilkan *loss diagram*, yaitu gambaran detail tentang tahapan kehilangan energi mulai dari radiasi global hingga output listrik bersih. Diagram ini memungkinkan pengguna untuk mengidentifikasi faktor dominan yang memengaruhi kinerja sistem, seperti *shading*, *mismatch*, suhu modul, maupun efisiensi inverter. Dengan demikian, PVsyst tidak hanya membantu dalam desain tetapi juga dalam proses optimasi sistem agar menghasilkan energi yang lebih efisien.

Selain aspek teknis, PVsyst juga dilengkapi fitur analisis ekonomi yang dapat digunakan untuk menilai kelayakan finansial proyek. Perhitungan ini mencakup estimasi biaya investasi, biaya operasional, umur proyek, hingga *levelized cost of electricity* (LCOE). PVsyst juga menghasilkan laporan teknis yang detail dengan format standar internasional, sehingga memudahkan pengguna dalam penyusunan dokumen resmi untuk kebutuhan akademis maupun pengajuan proyek. Dengan fitur-fitur tersebut, PVsyst menjadi salah satu alat yang penting dalam pengembangan energi surya, termasuk di Indonesia.

2.6 Kelayakan

Analisis kelayakan merupakan tahapan penting dalam studi suatu proyek pembangkit listrik, termasuk proyek Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Kajian kelayakan ini bertujuan untuk menilai apakah proyek dapat dilaksanakan secara berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek finansial maupun non-finansial. Dengan adanya analisis kelayakan, pengembang proyek dapat mengambil keputusan yang tepat terkait investasi, operasional, maupun dampak sosial-lingkungan dari proyek tersebut.

2.6.1 Kelayakan Finansial

Kelayakan finansial berfokus pada analisis biaya dan manfaat finansial dari proyek. Beberapa indikator utama yang digunakan adalah *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), dan *Payback Period* (PBP). NPV menunjukkan nilai bersih investasi setelah memperhitungkan arus kas masuk dan keluar dalam periode tertentu, sementara IRR menunjukkan tingkat pengembalian internal proyek. BCR digunakan untuk membandingkan manfaat terhadap biaya, sedangkan PBP menghitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk menutup biaya investasi awal [29].

Dalam konteks PLTS, kelayakan finansial sangat dipengaruhi oleh harga investasi awal (CAPEX), biaya operasional tahunan (OPEX), tarif listrik yang berlaku, insentif pemerintah, serta *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) [6]. Proyek dikatakan layak secara finansial apabila indikator-

indikator tersebut menunjukkan hasil yang positif dan kompetitif dibandingkan dengan sumber energi lainnya.

Evaluasi kelayakan suatu proyek energi umumnya dilakukan melalui pendekatan *discounted cash flow* (DCF) yang memperhitungkan nilai waktu uang (*time value of money*). Indikator paling umum dalam pendekatan ini adalah *Net Present Value* (NPV). NPV didefinisikan sebagai selisih antara seluruh manfaat ekonomi yang didiskonto dengan total biaya investasi dan operasional selama periode proyek. Nilai NPV positif mengindikasikan bahwa proyek menghasilkan manfaat ekonomi bersih pada nilai saat ini sehingga layak secara finansial, sedangkan NPV negatif menunjukkan ketidaklayakan[30]. Nilai NPV dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [31].

$$NPV = \sum_{t=0}^n NB (1 + i)^{-n} \quad (2.4)$$

Dimana:

NB = Net Benefit (Benefit – Cost O&M) pada tahun ke- n

i = Discount Rate (%)

n = Periode dalam tahun (umur investasi)

Selain NPV, *Internal Rate of Return* (IRR) menjadi parameter penting dalam pengambilan keputusan investasi [32]. IRR adalah tingkat diskonto yang menyebabkan nilai NPV sama dengan nol. IRR menunjukkan tingkat pengembalian internal suatu proyek berdasarkan arus kas yang dihasilkan [33]. IRR sering digunakan untuk membandingkan teknologi energi terbarukan karena lebih mudah dipahami pemangku kebijakan dan lembaga pembiayaan. Nilai IRR dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [31].

$$IRR = i + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} \times (i_2 - i_1) \quad (2.5)$$

Dimana:

i = tingkat suku bunga

i₁ = tingkat suku bunga yang bisa menghasilkan nilai positif NPV

i₂ = tingkat suku bunga yang bisa menghasilkan nilai negatif NPV

NPV₁ = nilai positif *Net Present Value*

NPV₂ = nilai negatif *Net Present Value*

Indikator lain yang relevan dalam analisis finansial adalah *Benefit–Cost Ratio* (BCR). BCR merupakan rasio antara manfaat (benefit) yang telah didiskonto terhadap biaya (cost) yang telah didiskonto [34]. Apabila nilai BCR > 1, maka manfaat proyek melebihi biaya dan proyek dapat

dianggap efisien secara ekonomi. Pendekatan BCR penting untuk membandingkan proyek energi terbarukan dengan skala investasi berbeda karena bersifat normalisasi manfaat terhadap biaya. Nilai *Net Benefit Cost Ratio* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [34].

$$BCR = \frac{Benefit}{Cost} \quad (2.6)$$

Discounted Payback Period merupakan metode ini berlandaskan konsep arus kas yang telah didiskonto, dan mengukur durasi yang dibutuhkan suatu proyek untuk menutup kembali biaya investasinya, umumnya dinyatakan dalam satuan tahun. Pendekatan ini dapat berfungsi sebagai indikator sederhana tingkat risiko, karena semakin singkat periode pengembalian, semakin rendah ketidakpastian finansial proyek. Secara praktis, metode ini menghasilkan keputusan evaluasi yang bersifat deterministik, yaitu proyek diterima apabila periode pengembaliannya berada di bawah batas waktu yang telah ditetapkan sebelumnya [35].

$$PBP = \frac{I_0}{\sum_{i=1}^n \frac{CF}{(1+i)^n}} \quad (2.7)$$

Dimana:

PBP = *Discounted payback Periode*

I_0 = Investasi Awal (Rp)

CF = *Cash Flow* (Rp)

I = *Discount Rate* (%)

n = Tahun

Levelized Cost of Energy (LCOE) merupakan indikator ekonomi yang digunakan untuk menentukan biaya produksi energi per satuan keluaran listrik selama umur operasi suatu proyek. Nilai LCOE diperoleh dengan membagi total biaya yang ditanggung sistem pembangkit—termasuk investasi awal, biaya operasi, pemeliharaan, serta penggantian komponen—dengan total energi listrik yang dihasilkannya sepanjang periode operasi. Dengan sifatnya yang menormalisasi biaya terhadap output energi, LCOE banyak dimanfaatkan sebagai alat pembandingan antar teknologi atau antar proyek pembangkit, baik pada konteks kapasitas, konfigurasi sistem, maupun lokasi yang berbeda [35]. LCOE atau biaya produksi energi listrik, merupakan nilai biaya per satuan energi yang harus dicapai agar nilai bersih sekarang (NPV) dari proyek pembangkitan listrik menjadi nol [36].

$$LCOE = \frac{Total\ Biaya\ Selama\ Umur\ Proyek}{Total\ Energi\ Yang\ dihasilkan} \quad (2.8)$$

atau

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{Ct}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{Et}{(1+r)^t}} \quad (2.9)$$

Dimana :

Ct = Cost pada tahun ke-n

Et = Energi yang dihasilkan pada tahun ke-n

2.6.2 Kelayakan Non finansial

Selain aspek finansial, kelayakan proyek PLTS juga ditentukan oleh faktor non-ekonomi yang meliputi aspek teknis, lingkungan, sosial, dan regulasi. Dari sisi teknis, kinerja sistem dipengaruhi oleh ketersediaan radiasi surya, kondisi iklim, serta pemilihan teknologi modul, inverter, dan infrastruktur pendukung agar proyek dapat beroperasi secara optimal.

Dari sisi lingkungan, PLTS memiliki keunggulan karena tidak menghasilkan emisi karbon secara langsung. Dengan demikian, proyek ini dapat berkontribusi signifikan terhadap penurunan emisi CO₂, yang merupakan salah satu tujuan utama transisi energi bersih. Manfaat ini tidak hanya mendukung target pengurangan emisi gas rumah kaca nasional. Aspek sosial meliputi penerimaan masyarakat, peluang penciptaan lapangan kerja, serta kontribusi terhadap pembangunan daerah. Sementara itu, dari sisi regulasi, keberhasilan proyek dipengaruhi oleh kebijakan energi terbarukan, insentif, serta kepastian hukum yang diberikan pemerintah. Dengan memperhatikan aspek-aspek non-finansial ini, proyek PLTS tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga memberikan manfaat nyata dalam mengurangi emisi karbon dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

2.7 Social Return on Investment (SROI)

Dalam evaluasi kelayakan proyek energi terbarukan, terdapat beberapa metode yang umum digunakan, seperti *Cost–Benefit Analysis* (CBA), *Life Cycle Assessment* (LCA), dan *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA). CBA banyak digunakan untuk menilai kelayakan ekonomi proyek, namun memiliki keterbatasan dalam menginternalisasi manfaat sosial dan lingkungan yang tidak memiliki nilai pasar secara langsung, sehingga berpotensi mengunderestimasi nilai proyek energi terbarukan [37]. LCA efektif dalam mengukur dampak lingkungan sepanjang siklus hidup teknologi, tetapi tidak dirancang untuk menilai kelayakan ekonomi maupun nilai sosial proyek [38]. Sementara itu, MCDA mampu mengintegrasikan berbagai kriteria pengambilan keputusan, namun

hasilnya sangat bergantung pada subjektivitas penentuan bobot dan tidak menghasilkan indikator pengembalian investasi berbasis nilai moneter [39].

Berbeda dengan metode-metode tersebut, *Social Return on Investment* (SROI) merupakan pendekatan evaluasi yang secara khusus dirancang untuk mengukur dan memonetisasi dampak sosial, lingkungan, dan ekonomi dari suatu intervensi, serta membandingkannya secara langsung dengan nilai investasi yang dikeluarkan. SROI memungkinkan internalisasi eksternalitas positif, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan efisiensi biaya lingkungan, ke dalam satu indikator rasio yang mudah dipahami oleh pengambil keputusan [40]. Dalam konteks pengembangan *extension Floating Solar PV on-grid* di PLTU Banten 3 Lontar, metode SROI dinilai lebih unggul karena mampu menangkap manfaat proyek yang tidak sepenuhnya tercermin dalam analisis finansial konvensional, serta sensitif terhadap perubahan kebijakan energi seperti harga karbon. Oleh karena itu, SROI dipilih sebagai metode yang paling relevan untuk menilai kelayakan sosial proyek energi terbarukan yang bersifat komplementer di lingkungan pembangkit berbasis fosil.

Social Return on Investment (SROI) merupakan kerangka evaluasi nilai yang mengintegrasikan dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan ke dalam analisis manfaat suatu program atau proyek. Berbeda dengan metode evaluasi finansial tradisional, SROI menilai dampak sosial bukan sebagai eksternalitas, tetapi sebagai bagian integral dari nilai yang dihasilkan oleh suatu intervensi. Pendekatan ini tidak hanya mengukur manfaat langsung, tetapi juga menangkap peningkatan kesejahteraan, perubahan perilaku, dan hasil non-material yang relevan bagi pemangku kepentingan. Oleh karena itu, SROI diposisikan sebagai metode berbasis nilai yang menuntut keterlibatan aktif para pemangku kepentingan (*stakeholder engagement*) dalam proses identifikasi outcome, pemilihan indikator, dan penentuan nilai finansial yang merepresentasikan manfaat sosial tersebut [41].

Menurut Mitchell *et al.* [41], model pada tabel di bawah ini merepresentasikan delapan prinsip evaluasi nilai sosial yang dikembangkan oleh Social Value International dan menjadi landasan metodologis dalam penerapan *Social Return on Investment* (SROI).

Tabel 2.2 Prinsip-prinsip *Social Value* dalam kerangka SROI [41]

Prinsip	Penjelasan
<i>Involve stakeholders</i>	Libatkan pihak terdampak dalam proses evaluasi nilai.

<i>Understand what changes</i>	Identifikasi perubahan (positif/negatif) yang terjadi akibat intervensi.
<i>Value the things that matter</i>	Monetisasi <i>outcome</i> yang bermakna bagi <i>stakeholder</i> .
<i>Only include what is material</i>	Sertakan hanya dampak yang signifikan terhadap keputusan.
<i>Do not over-claim</i>	Hindari klaim dampak yang melebihi kontribusi sebenarnya.
<i>Be transparent</i>	Jelaskan metode, asumsi, batasan, serta sumber data secara terbuka.
<i>Verify the result</i>	Validasi hasil melalui verifikasi independen atau pihak ketiga.
<i>Be responsive</i>	Gunakan temuan untuk perbaikan kebijakan/program secara berkelanjutan.

Menurut *A Guide to Social Return on Investment* [40], terdapat dua pendekatan utama dalam penerapan SROI, yaitu *forecast* SROI dan *evaluative* SROI.

1. *Forecast* SROI adalah analisis SROI yang dilakukan sebelum program atau intervensi dijalankan, sehingga fokusnya pada estimasi potensi manfaat sosial yang akan dihasilkan di masa mendatang. Tujuannya yaitu memberikan gambaran apakah suatu proyek layak dilaksanakan dan membantu pembuat kebijakan, investor, atau organisasi memahami nilai sosial yang diprediksi dibandingkan biaya yang akan dikeluarkan.
2. *Evaluative* SROI dilakukan ketika program sudah berjalan atau sudah selesai, sehingga analisis menggunakan data empiris mengenai perubahan yang benar-benar terjadi. Tujuannya adalah menilai efektivitas, nilai sosial, dan tingkat keberhasilan proyek. Serta memberikan bukti kepada donor, publik, regulator, atau pengambil keputusan.

Analisis SROI dilakukan melalui enam tahapan sistematis, dimulai dari penetapan ruang lingkup dan identifikasi *stakeholder*, pemetaan *outcomes* melalui *impact map*, pembuktian dan pemberian nilai terhadap *outcomes*, perhitungan dampak bersih yang mengoreksi *deadweight*, *displacement*, *attribution*, serta *drop-off*, hingga perumusan nilai sosial melalui perhitungan rasio SROI berbasis nilai kini manfaat dan investasi [40].

1. *Establishing Scope and Identifying Stakeholders*

Pada tahap awal, analisis SROI menetapkan ruang lingkup evaluasi secara eksplisit, termasuk tujuan, batas aktivitas, rentang waktu, dan ketersediaan sumber daya. Selanjutnya, pihak yang terdampak, baik secara langsung maupun tidak langsung, diidentifikasi sebagai stakeholder utama. Prinsip dasar tahap ini adalah memastikan bahwa semua pihak yang mengalami perubahan akibat intervensi diperhitungkan.

2. *Mapping Outcomes*

Tahap kedua membangun kerangka kausal yang menjelaskan bagaimana sumber daya (*inputs*) digunakan dalam aktivitas (*activities*) untuk menghasilkan keluaran (*outputs*), yang kemudian menimbulkan perubahan yang dialami stakeholder (*outcomes*). Struktur ini diwujudkan melalui *impact map* atau *theory of change*. Fokus utama tahap ini bukan pada output operasional, melainkan pada transformasi yang dialami stakeholder dan bagaimana perubahan tersebut dihubungkan secara logis dengan intervensi organisasi.

3. *Evidencing Outcomes and Giving Them a Value*

Tahap ketiga bertujuan mengukur *outcome* secara empiris dan memberikan nilai ekonomi terhadapnya. *Outcome* dibuktikan melalui indikator, data hasil survei, data administratif, atau bukti perilaku. Setelah *outcome* teridentifikasi dan durasinya diketahui, nilai moneter diberikan menggunakan *financial proxies*. Monetisasi tersebut memungkinkan *outcome* non-finansial—misalnya peningkatan kualitas hidup atau akses layanan—dikonversi ke dalam satuan ekonomi sehingga dapat dibandingkan dengan biaya investasi.

4. *Establishing Impact*

Pada tahap ini, dampak bersih dihitung dengan mengoreksi *outcome* dari faktor eksternal. Nilai yang dihitung harus mengabaikan bagian *outcome* yang bukan disebabkan intervensi, yaitu melalui *deadweight* (apa yang terjadi tanpa program), *attribution* (kontribusi pihak lain), *displacement* (pergeseran manfaat ke pihak atau area lain), dan *drop-off* (penurunan dampak dari waktu ke waktu). Tujuan tahap ini adalah memastikan kausalitas sehingga hanya nilai yang benar-benar dihasilkan oleh program yang diperhitungkan sebagai *impact*.

5. *Calculating the SROI*

Tahap ini melakukan perhitungan nilai ekonomi dari keseluruhan dampak bersih dibandingkan nilai investasi. Perhitungan dimulai dengan memproyeksikan manfaat ke masa depan, menerapkan diskonto sesuai *time value of money*, lalu menghitung *net present value (NPV)*. Rasio SROI diperoleh dari perbandingan antara present value manfaat sosial dan total nilai input. Analisis sensitivitas kemudian dilakukan untuk menguji stabilitas hasil terhadap variasi asumsi serta parameter model.

6. *Reporting, Using and Embedding*

Tahap akhir menekankan pelaporan hasil kepada *stakeholder*, penggunaan temuan sebagai dasar pengambilan keputusan, serta integrasi evaluasi ke dalam sistem organisasi. SROI tidak dipandang sebagai angka rasio semata, tetapi sebagai mekanisme pembelajaran yang berorientasi pada peningkatan efektivitas program, tata kelola organisasi, dan keberlanjutan dampak sosial

Secara umum, rumus perhitungan SROI dapat dituliskan sebagai berikut [40] :

$$SROI = \frac{Total\ Present\ Value\ of\ benefits}{Total\ Present\ Value\ of\ Investment\ (Input)} \quad (2.10)$$

Dengan demikian, SROI merupakan instrumen penting untuk melengkapi analisis teknis dan ekonomis, karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai nilai sosial dan lingkungan dari suatu proyek, termasuk pengembangan *Floating Solar PV* di Indonesia.