

STUDI POTENSI DAN PERANCANGAN PLTS APUNG DI DANAU BATUR GUNA MENDUKUNG BALI *CLEAN ENERGY*

Christian Oswald Mangatur¹, I Nyoman Setiawan², I Nyoman Satya Kumara²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Kec. Kuta Sel, Kabupaten Badung, Bali 80361

tianoswald7@gmail.com

ABSTRAK

Provinsi Bali merupakan provinsi dengan potensi energi surya sebesar 1.254 MW namun baru dimanfaatkan sebesar 3,7 MWp sampai dengan tahun 2020. Salah satu faktor lambatnya pembangunan PLTS di Bali adalah karena diperlukannya lahan yang luas untuk pembangunan PLTS skala besar. Salah satu solusi untuk mengatasi terbatasnya lahan untuk PLTS skala besar adalah dengan memanfaatkan badan air melalui penerapan PLTS apung. Danau Batur merupakan danau terluas di Bali dan memiliki potensi sebagai lokasi untuk PLTS apung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi teknis PLTS apung dan perancangan sistem PLTS apung di Danau Batur. Dengan mengacu pada rencana pemanfaatan Danau Batur dan regulasi pemanfaatan PLTS apung, Danau Batur memiliki potensi teknis PLTS apung sebesar 76,44 MWp. Rancangan PLTS apung di Danau Batur dibuat dengan tiga skenario. Ketiga skenario PLTS apung menunjukkan hasil *performance ratio* yang berada dalam rentang 75-85%. Sistem PLTS apung juga menunjukkan adanya peningkatan performa jika dibandingkan dengan sistem PLTS *ground mounted*.

Kata kunci: Danau Batur, PLTS Apung, Potensi Teknis, *U-value*

ABSTRACT

The province of Bali has a solar energy potential of 1,254 MW but has only utilized 3.7 MWp up to the year 2020. One of the factors contributing to the slow development of PV in Bali is the need for large land areas for the construction of large-scale PV system. One solution to address the limited land availability for large-scale PV is by utilizing bodies of water through the implementation of floating PV. Lake Batur is the largest lake in Bali and has the potential to serve as a location for floating PV. This research aims to determine the technical potential of floating PV and design a system for floating PV in Lake Batur. With reference to the Lake Batur utilization plan and regulations for the use of floating PV, Lake Batur has a technical potential for floating PV of 76.44 MWp. The design of floating PV in Lake Batur is created with three scenarios. All three scenarios for floating PV show performance ratios within the range of 75-85%. The floating PV system also demonstrates an improvement in performance when compared to ground-mounted PV systems.

Key Words: Lake Batur, Floating PV, Technical Potential, *U-value*

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang masih bergantung pada sumber energi fosil yang tidak dapat diperbarui [1]. Sebagai upaya dalam mengembangkan energi secara nasional, pemerintah telah menetapkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang diatur dalam

Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 sebagai penjabaran dari Kebijakan Energi Nasional (KEN). Melalui RUEN, pemerintah menetapkan upaya untuk mendorong pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) dengan target tercapainya bauran EBT sebesar 23% pada tahun 2025 dan sebesar 31% pada tahun 2050 [2]. Tidak

hanya mendorong pemanfaatan EBT hanya dari segi nasional, pemerintah juga mendorong upaya pemanfaatan EBT pada tiap daerah.

Dalam mendukung target bauran EBT nasional, Bali menjadi salah satu provinsi yang cukup progresif dalam mendukung bauran EBT di Indonesia. Hal tersebut ditunjukkan oleh Bali dengan adanya target target bauran EBT sebesar 11,5% pada tahun 2025 yang tertuang dalam Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Provinsi Bali [3]. Bali juga telah memiliki peraturan yang secara spesifik mendukung adanya pengelolaan energi bersih yang bersumber dari sumber energi terbarukan yaitu Peraturan Gubernur Bali Nomor 45 Tahun 2019 tentang Bali Energi Bersih [4]. Walaupun memiliki beberapa regulasi yang mendukung pemanfaatan EBT, angka realisasi capaian bauran EBT di Bali masih berada pada angka 1,29% pada tahun 2021 [5]. Dengan potensi sebesar 1.254 MW [3], energi surya dapat menjadi sumber energi terbarukan yang mampu mendorong bauran EBT di Bali namun pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Bali belum begitu besar yakni baru sebesar 3,7 MWp pada tahun 2020 [6] dari target sebesar 228 MW pada tahun 2025 [3].

Adapun penyebab lambatnya progress dalam pembangunan PLTS salah satunya di Bali diakibatkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah diperlukannya lahan yang cukup luas terutama dalam pembangunan PLTS skala besar. Hal tersebut dapat dilihat dari berbagai proyek PLTS skala besar yang telah dibangun di Indonesia diantaranya PLTS *ground-mounted* Kayubih 1 MWp di Kabupaten Bangli yang memerlukan lahan seluas 1,2 Ha [7], PLTS *ground-mounted* Likupang 21 MWp yang memerlukan lahan seluas 29 Ha [8] dan PLTS *ground-mounted* Kupang 5 MWp yang memerlukan lahan seluas 7,5 Ha [9]. Selain itu Bali merupakan pulau dengan ukuran yang tidak terlalu besar dengan sektor pariwisatanya yang berkembang di seluruh wilayah pulau sehingga lahan yang tersedia terus menurun serta memiliki harga pembelian yang tinggi [10]. Adapun pemanfaatan badan air sebagai lokasi penempatan modul surya atau teknologi PLTS apung dapat menjadi solusi untuk mengatasi terbatasnya lahan.

PLTS apung merupakan teknologi sistem PLTS yang dipasang atau diletakkan di atas badan air secara terapung [11]. Pemanfaatan PLTS apung saat ini sudah mulai dikembangkan di Indonesia salah satunya dengan adanya dukungan pemerintah melalui Peraturan Menteri PUPR Nomor 6 Tahun 2020 tentang Bendungan yang memperbolehkan pemanfaatan maksimal 5% dari luas genangan waduk untuk PLTS [12]. Selain itu perkembangan pemanfaatan PLTS apung di Indonesia juga didukung dengan mulai dibangunnya beberapa proyek PLTS apung seperti PLTS apung di Waduk Cirata dengan kapasitas 145 MW [13] dan PLTS apung pertama dengan teknologi *bifacial* dengan kapasitas 10 kWp di Danau Mahoni Universitas Indonesia (UI) [14].

Bali memiliki beberapa potensi sumber daya air salah satunya adalah Danau Batur yang merupakan danau terluas di Bali dengan luas permukaan danau seluas 1.609,195 Ha [15]. Berdasarkan data *Global Solar Atlas* Danau Batur memiliki potensi iradiasi matahari sekitar 4,70 kWh/m²/hari [16].

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui potensi teknis PLTS apung di Danau Batur dan juga perancangan sistem PLTS baik penentuan kapasitas, konfigurasi, gambar peletakkan, dan simulasi produksi energi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang bersumber dari sumber energi terbarukan yaitu energi radiasi matahari dengan bantuan konversi sel fotovoltaik. Sistem kerja PLTS sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari, PLTS akan memproduksi daya yang lebih besar jika memperoleh intensitas radiasi matahari yang semakin besar [17].

2.2 Jenis – Jenis Sistem PLTS

Sistem PLTS *on-grid* merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan seperti jaringan PLN yang mendapatkan suplai dari pembangkit lainnya sehingga tidak memerlukan baterai sebagai *backup* [18]. Sistem PLTS *off-grid* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan [18]. Sistem PLTS *hybrid* merupakan sistem PLTS yang digabungkan dengan pembangkit-pembangkit listrik lainnya seperti

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) atau pembangkit lainnya [18].

2.3 PLTS Apung

PLTS apung merupakan teknologi sistem PLTS yang dipasang atau diletakkan di atas badan air secara terapung seperti pada danau dan waduk [11]. Terdapat beberapa keunggulan sistem PLTS apung diantaranya adalah adanya peningkatan produksi karena suhu perairan yang lebih rendah 5°C [19], tidak memerlukan lahan, instalasi yang lebih mudah [11] dan mampu mengurangi evaporasi air [20].

2.4 Komponen PLTS Apung

Komponen pertama yaitu Modul surya yang merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS yang menggunakan proses fotoelektrik untuk mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Adapun terdapat faktor-faktor yang dapat mempengaruhi *output* modul surya seperti radiasi matahari yang mencapai permukaan modul surya, orientasi dan kemiringan modul surya, bayangan (*shading*) serta temperatur dari modul surya [21].

Inverter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS yang berfungsi untuk mengkonversi listrik yang dihasilkan oleh modul surya atau listrik DC menjadi listrik AC [22]. Berdasarkan konfigurasi, *inverter* diklasifikasikan ke dalam tiga jenis, yaitu *central inverter*, *string inverter*, *microinverter*.

Struktur pengapung merupakan salah satu komponen utama dalam sistem PLTS apung yang memiliki daya apung untuk mengapungkan modul surya, peralatan listrik serta membantu proses konstruksi ataupun *Operational & Maintenance* (O&M). Umumnya dalam proyek PLTS apung, sistem pengapung terbuat dari material *high-density polyethylene* (HDPE) [23].

Sistem *anchoring* dan *mooring* merupakan komponen sistem PLTS apung yang menjaga struktur pengapung agar tetap pada lokasi peletakkan dan memberikan kestabilan mekanis [23]. Sistem *anchoring* dapat dilakukan dengan berbagai metode. Metode pertama yaitu *bank anchoring* atau penjangkaran pada tepi perairan, metode kedua yaitu *bottom*

anchoring atau penjangkaran ke dasar perairan dan metode *piles* atau penjangkaran ke dasar perairan dengan menambatkan kabel *mooring* pada *piles* yang ditanam di dasar [20].

2.5 Potensi dan Perancangan PLTS Apung

Pemanfaatan PLTS apung pada badan air telah diatur pemerintah melalui Peraturan Menteri PUPR Nomor 6 Tahun 2020. Dalam peraturan menteri tersebut, pemanfaatan badan air salah satunya pada waduk untuk PLTS apung dapat dilakukan dengan pemanfaatan maksimal 5% dari luas permukaan perairan [12]. Adapun untuk 1 MWp PLTS apung membutuhkan area perairan seluas 1 hektar [23].

Kapasitas sistem PLTS umumnya terdiri atas kapasitas sistem DC atau total kapasitas modul surya dan sistem AC atau total kapasitas *inverter*. Dalam mendesain suatu sistem PLTS, sebaiknya kapasitas sistem DC dan kapasitas sistem AC memiliki rasio (DC/AC *ratio*) lebih besar dari 1 atau untuk daerah tropis direkomendasikan sekitar 1,1 – 1,3 karena karakteristik pembangkitan sistem PLTS berada di bawah kapasitas *inverter* [24]. Adapun kapasitas PLTS dari sisi DC dapat dihitung dengan persamaan berikut [24]:

$$P_{PV_DC} = \frac{DC}{AC} \text{ ratio} \times P_{PV_AC} \quad (1)$$

Keterangan:

P_{PV_DC} = Kapasitas PLTS sistem DC (Wp)

P_{PV_AC} = Total kapasitas *inverter* (Watt)

Untuk menghitung jumlah modul surya dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut [24]:

$$N_{Modul} = \frac{P_{PV_DC}}{P_{max_modul}} \quad (2)$$

Keterangan:

P_{max_modul} = Daya *output* maksimum modul surya (Wp)

Untuk memenuhi spesifikasi teknis agar dapat terhubung dengan *inverter*, kumpulan modul surya dapat dirangkai dengan konfigurasi sebagai berikut:

1. Konfigurasi Seri

Pada konfigurasi secara seri, atau yang biasa disebut *string*, modul-modul surya tersebut memiliki tegangan total yang setara dengan penjumlahan

tegangan masing-masing modul dengan arus total setara dengan arus masing-masing modul surya [22]. Untuk menentukan jumlah modul surya yang dapat diseri atau jumlah modul dalam suatu *string*, dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut [25]:

$$N_{Modul_max} = \frac{V_{Inv_max}}{V_{OC}} \quad (3)$$

$$N_{Modul_min} = \frac{V_{MPP_Min}}{V_{MPP_Module}} \quad (4)$$

Keterangan:

N_{Modul_max} = jumlah maksimum modul surya dalam suatu *string*

N_{Modul_min} = jumlah minimum modul surya dalam suatu *string*

V_{Inv_max} = tegangan input maksimal inverter (V)

V_{OC} = tegangan sirkuit terbuka modul (V)

V_{MPP_Min} = tegangan kerja minimal dari MPPT inverter (V)

V_{MPP_Module} = tegangan operasi modul surya (V)

2. Konfigurasi Paralel

Pada konfigurasi secara paralel, modul-modul surya tersebut memiliki tegangan total yang setara dengan arus masing-masing modul surya dengan arus total yang setara dengan penjumlahan arus masing-masing modul [22]. Untuk menentukan jumlah *string* yang dapat dihubungkan paralel, dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut [25]:

$$N_{string} = \frac{I_{Inv_max}}{I_{String_max}} \quad (5)$$

Keterangan:

N_{string} = jumlah *string* maksimum tiap MPPT

I_{Inv_max} = arus input maksimum inverter (A)

I_{String_max} = arus maksimum *string* (A)

2.6 Efek Pendinginan PLTS Apung

Salah keunggulan dari sistem PLTS apung adalah adanya efek pendinginan yang dapat meningkatkan produksi PLTS [19]. Semakin tinggi temperatur lingkungan maka efisiensi modul surya akan mengalami penurunan

[21]. Temperatur dari suatu *array* modul dapat dimodelkan dengan persamaan keseimbangan energi antara iradiasi yang datang dan energi yang dikonversi sebagai berikut [26]:

$$U(T_{array} - T_{amb}) = \alpha G_t(1 - h) \quad (6)$$

Keterangan:

U = *U-value* atau *thermal loss factor* (W/(m²K))

T_{array} = Temperatur modul surya (K)

T_{amb} = Temperatur lingkungan (K)

α = daya serap modul surya

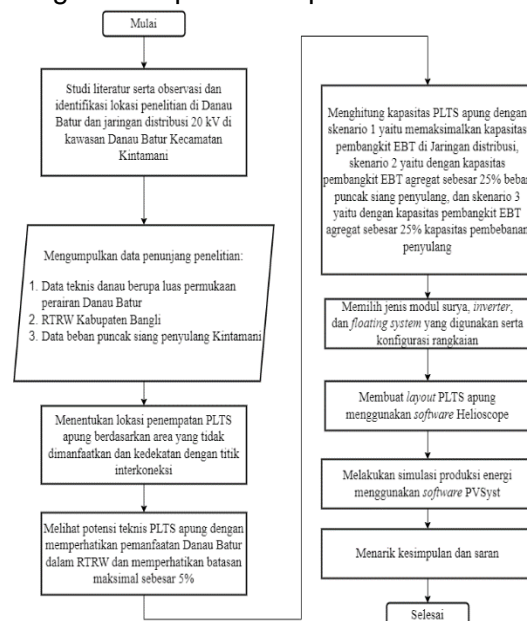
G_t = Iradiasi modul surya (W/m²)

h = efisiensi modul surya (%)

Parameter *u-value* pada persamaan diatas menunjukkan efektifitas pembuangan panas ke lingkungan oleh modul surya. Semakin besar nilai *u-value*, maka sistem lebih efektif dalam melepas panas atau memiliki temperatur operasi yang lebih rendah sehingga dapat meningkatkan performa dari sistem PLTS [23]. Dalam sistem PLTS apung, nilai *u-value* dipengaruhi oleh jenis teknologi *floate* yang digunakan, dimana untuk HDPE memiliki nilai *u-value* sebesar 31 W/m²K dan *galvanized steel* memiliki nilai *u-value* sebesar 46 W/m²K [27].

3. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam melakukan penelitian, penelitian dilakukan berdasarkan diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kawasan Danau Batur dan jaringan distribusi 20 kV Penyulang Kintamani Kecamatan Kintamani Kabupaten Bangli dari bulan Januari hingga Mei 2023. Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer yang digunakan meliputi lokasi jaringan distribusi di sekitar Danau Batur. Data sekunder meliputi data yang bersumber dari Ditjen Sumber Daya Air (SDA) Kementerian PUPR, Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali Penida, PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan Bali Timur, PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pengatur Distribusi Bali dan PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Bangli.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Danau Batur

Danau Batur yang berlokasi di Kecamatan Kintamani Kabupaten Bangli merupakan danau terluas di Bali yang memiliki luas perairan sekitar 1.609,195 Ha, kedalaman maksimum sedalam 73 m serta memiliki volume sebesar $844,427 \times 10^6 \text{ m}^3$ [15].

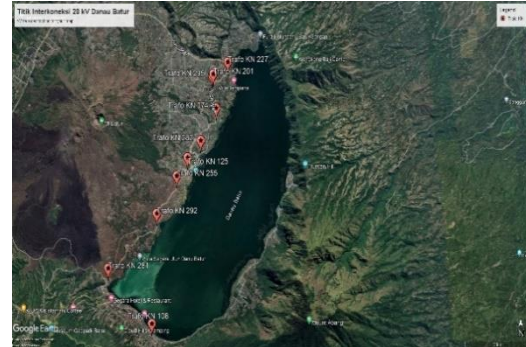
Berdasarkan Peraturan Daerah Kabupaten Bangli Nomor 9 Tahun 2013 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Bangli Tahun 2013 – 2033, kawasan perairan Danau Batur dimanfaatkan untuk berbagai kegiatan diantaranya adalah sebagai jalur penyeberangan, sebagai sumber air baku, kegiatan perikanan dan juga sebagai daerah wisata [28]. Adapun kawasan Danau Batur didukung oleh jaringan distribusi 20 kV Penyulang Kintamani. Dalam penelitian, PLTS akan diinterkoneksi pada jaringan tegangan menengah 20 kV Penyulang Kintamani.

4.2 Penentuan Lokasi PLTS Apung

4.2.1 Berdasarkan Titik Interkoneksi

Dalam penelitian ini, PLTS apung akan diinterkoneksi pada jaringan distribusi 20 kV Penyulang Kintamani. Lokasi interkoneksi PLTS apung ditentukan dengan melakukan survey titik-titik trafo distribusi Penyulang Kintamani di sekitar Danau Batur yang dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan hasil observasi sisi

barat Danau Batur cocok sebagai peletakkan PLTS apung karena memiliki banyak persebaran trafo distribusi Penyulang Kintamani.



Gambar 2. Sebaran titik-titik trafo distribusi 4.2.2 Berdasarkan Pemanfaatan Keramba Jaring Apung

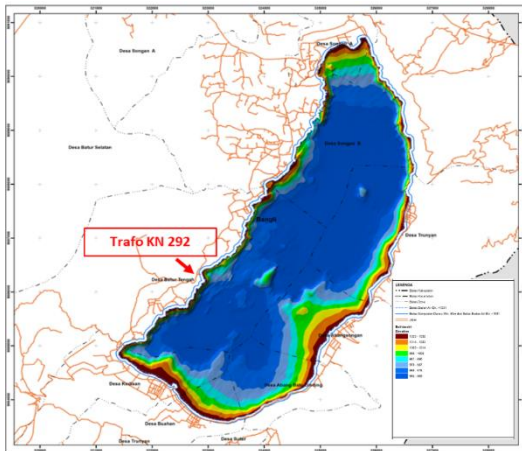


Gambar 3. Observasi pemanfaatan KJA Selain berdasarkan titik interkoneksi, penentuan lokasi penempatan PLTS apung dalam penelitian ini juga melihat area yang dimanfaatkan untuk Keramba Jaring Apung (KJA) agar tidak mengganggu aktivitas perikanan yang dilakukan oleh masyarakat. Adapun observasi pemanfaatan KJA dilakukan secara satelit menggunakan *google earth* yang ditunjukkan oleh area berwarna merah pada Gambar 3. Berdasarkan hasil observasi pada Gambar 3, area perairan dekat dengan trafo KN 292 cocok untuk peletakkan PLTS apung karena tidak terlalu banyak terdapat KJA.

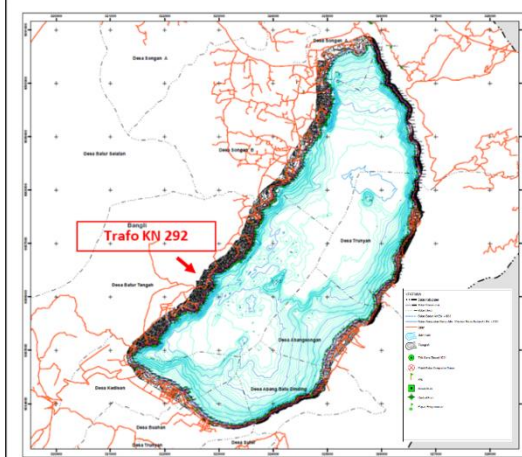
4.2.3 Berdasarkan Peta Batimetri

Peta batimetri merupakan peta yang menggambarkan dasar dari suatu badan air [23]. Badan air dengan dasar perairan yang relatif datar merupakan area yang direkomendasikan untuk lokasi PLTS apung [23] karena dapat memberikan fondasi sistem *anchoring* yang lebih stabil. Gambar 4 menunjukkan kondisi elevasi

perairan Danau Batur, area dengan variasi warna yang minim menunjukkan dasar perairan yang relatif datar. Gambar 5 menunjukkan garis-garis kontur Danau Batur yang menggambarkan kedalaman Danau Batur, area dengan variasi garis kontur yang minim menunjukkan dasar perairan yang relatif datar. Adapun kondisi elevasi dan garis kontur Danau Batur menunjukkan area perairan sekitar trafo KN 292 cocok untuk peletakan PLTS apung karena merupakan area perairan dengan dasar perairan yang relatif datar.



Gambar 4. Peta batimetri Danau Batur [15]



Gambar 5. Peta situasi sempadan Danau Batur [15]

Berdasarkan kedekatan dengan titik interkoneksi, pemanfaatan KJA serta melihat kondisi batimetri dari Danau Batur, lokasi penempatan PLTS apung yang diusulkan ditunjukkan oleh area kuning pada Gambar 6. Area tersebut cocok untuk peletakan PLTS apung karena dekat dengan jaringan distribusi 20 kV Penyulang

Kintamani, tidak terdapat banyak KJA dan kondisi dasar perairan yang relatif datar. Dengan peletakan pada area tersebut, PLTS apung yang dirancang tidak mengganggu aktivitas perikanan yang dilakukan oleh masyarakat.

4.3 Skenario Pembahasan Penelitian

Dalam penelitian terdapat beberapa pembahasan yaitu analisa potensi teknis PLTS apung yang memperhatikan rencana pemanfaatan perairan Danau Batur dan Permen PUPR Nomor 6 Tahun 2020 serta perancangan sistem PLTS Apung dengan tiga skenario kapasitas. Pada skenario pertama PLTS apung dirancang dengan memaksimalkan kapasitas pembangkit EBT yang dapat terhubung pada jaringan distribusi. Pada skenario kedua, PLTS apung dirancang dengan kapasitas yang tidak melebihi 25% beban puncak siang Penyulang Kintamani. Pada skenario ketiga, PLTS apung dirancang dengan kapasitas yang tidak melebihi 25% kapasitas pembebanan Penyulang Kintamani.



Gambar 6. Rencana lokasi PLTS apung

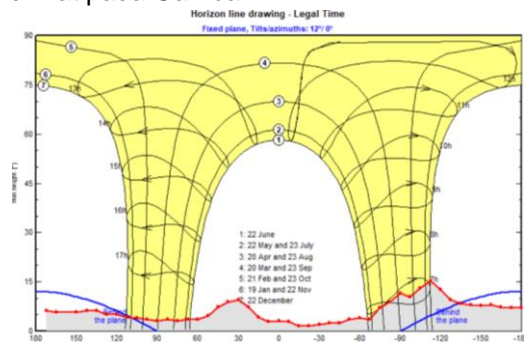
4.4 Potensi Teknis PLTS Apung

4.4.1 Kondisi Meteorologi

Untuk melihat kondisi meteorologi di Danau Batur, penelitian ini menggunakan sumber data meteorologi meteonorm guna melihat potensi iradiasi matahari di Danau Batur. Berdasarkan data meteorologi di Danau Batur, Danau Batur memiliki potensi iradiasi matahari berupa nilai *Global Horizontal Irradiation* (GHI) sebesar 5,83 kWh/m²/hari. Jika dibandingkan dengan nilai rata-rata iradiasi matahari di Provinsi Bali yaitu sebesar 4,89 kWh/m²/hari [10],

daerah Danau Batur memiliki nilai iradiasi yang lebih tinggi.

Guna mengetahui potensi *shading* karena Danau Batur diapit oleh dua gunung, dalam penelitian ini dilakukan simulasi *far shading* pada software PVsyst. Simulasi *far shading* merupakan simulasi yang menggambarkan potensi bayangan atau jalur matahari yang tertutup oleh obyek-obyek yang berlokasi cukup jauh dari area PLTS seperti gunung. Hasil simulasi *far shading* pada software PVsyst dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. *Far shading* di Danau Batur

Pada Gambar 7 dapat dilihat garis biru menunjukkan area dimana matahari garis merah menunjukkan garis cakrawala, dan area dibawah garis merah menunjukkan jalur matahari yang terhalangi oleh obyek cakrawala seperti gunung. Hasil simulasi *far shading* menunjukkan bahwa terdapat potensi *far shading* pada pagi hari dari Gunung Abang yang berlokasi di sisi timur danau dan pada siang hari dari Gunung Batur yang berlokasi di sisi barat danau. Dampak *far shading* terhadap produksi sistem PLTS dapat diketahui setelah melakukan simulasi produksi.

4.4.2 Penentuan Potensi Teknis

Danau Batur memiliki luas permukaan seluas 1.609,195 Ha. Berdasarkan RTRW Kabupaten Bangli, terdapat rencana pemanfaatan perairan Danau Batur untuk kegiatan perikanan oleh masyarakat melalui Keramba Jaring Apung (KJA) seluas 5% atau seluas 80,45 Ha. Adapun luas perairan Danau Batur yang dapat dimanfaatkan untuk pemanfaatan lainnya dapat diketahui dengan mengurangi luas Danau Batur dengan luas perairan

yang akan dimanfaatkan untuk KJA sebesar 5%. Sehingga luas Danau Batur yang dapat dimanfaatkan untuk pemanfaatan lain adalah seluas 1.528,74 Ha.

Potensi teknis PLTS apung atau potensi kapasitas PLTS apung yang dapat dimanfaatkan di Danau Batur dapat diketahui dengan mengacu pada Permen PUPR Nomor 6 Tahun 2020 dimana luas perairan yang dapat dimanfaatkan untuk PLTS maksimal sebesar 5%. Dengan luas Danau Batur yang dapat dimanfaatkan untuk pemanfaatan lain seluas 1.528,74 Ha, luas perairan yang dapat dimanfaatkan untuk PLTS apung adalah sebesar 76,44 Ha atau 5% dari luas perairan yang dapat dimanfaatkan. Dengan menggunakan asumsi satu hektar area perairan untuk satu Mega Watt *Peak* (MWp) [23], Danau Batur memiliki potensi teknis PLTS apung sebesar 76,44 MWp.

4.5 Penentuan Batasan Kapasitas

Pada skenario 1 batasan kapasitas PLTS apung yang digunakan adalah tidak melebihi kapasitas maksimum pembangkit EBT pada jaringan distribusi yang disampaikan dalam Peraturan Direksi PT PLN (Persero) No. 0064.P/Dir/2019 dan Keputusan Direksi No.0357.K/Dir/2014 yaitu sebesar 10 MW yang mengacu pada kapasitas komponen *inverter* [29] [30].

Pada skenario 2 batasan kapasitas PLTS apung yang digunakan adalah tidak melebihi 25% beban puncak penyulang yang direkomendasikan oleh PT PLN (Persero) guna meminimalisir dampak pada jaringan akibat penetrasi PLTS [29], [30]. Dengan beban puncak siang tertinggi Penyulang Kintamani pada tahun 2022 sebesar 4,9 MW yang terdapat pada bulan September, batasan kapasitas PLTS dari sisi AC yang digunakan sebesar 1,23 MW.

Pada skenario 3, PLTS apung dirancang tidak melebihi 25% kapasitas pembebanan Penyulang Kintamani guna melihat dampak PLTS apung apabila dirancang lebih besar dari 25% beban penyulang. Dengan penghantar yang digunakan yaitu AAAC 150 mm² Penyulang Kintamani memiliki kapasitas pembebanan sebesar 12 MW, batasan kapasitas PLTS

apung pada skenario 3 adalah sebesar 3 MW.

4.6 Konfigurasi komponen PLTS

4.6.1 Inverter

Tabel 1. Standar sertifikasi inverter [24]

No	Standar	Tentang
1.	IEC 61727	Syarat-syarat yang diperlukan inverter PV untuk interkoneksi sistem PV pada sistem distribusi utilitas.
2.	IEC 62116	Syarat-syarat minimum fitur <i>anti-islanding</i> pada inverter PV.
3.	IEC 62109-1 dan IEC 62109-2	Syarat-syarat teknis keamanan (<i>safety</i>) pada inverter PV baik itu <i>standalone</i> , <i>on-grid</i> , maupun mikrogrid interaktif.
4.	IEC 60068	Pengujian produk maupun komponen elektronik terhadap keadaan lingkungan, seperti temperatur dingin dan panas yang ekstrem.

Dalam menentukan komponen inverter, terdapat beberapa sertifikasi yang perlu dimiliki oleh suatu pabrikan inverter guna memastikan inverter dapat beroperasi sesuai standar seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi inverter Huawei [31]

No	Parameter	Penjelasan	Satuan	Nilai
<i>Input DC</i>				
1.	V_{max}	Tegangan sistem DC maksimum	Volt	1100
2.	V_{mppt}	Tegangan <i>range Maximum Power Point Tracker</i> (MPPT)	Volt	200 - 1000
3.	I_{max} per MPPT	Arus input DC maksimum tiap MPPT	Ampere	26
4.	I_{scmax} per MPPT	Arus hubung singkat maksimum tiap MPPT	Ampere	40
5.	Jumlah MPPT	Jumlah MPPT yang dimiliki inverter	Buah	10
6.	Jumlah input DC	Jumlah input yang dapat terhubung ke inverter	Buah	20
<i>Output AC</i>				
1.	P_N	Daya nominal output AC	Watt	100.000
2.	I_N	Arus nominal output AC	Ampere	144,4
3.	V_N	Tegangan nominal output AC	Volt	400

Inverter yang digunakan merupakan *string inverter* karena mampu menghasilkan *energy yield* yang lebih tinggi, fleksibel, mudah dalam proses logistik, dan telah digunakan dalam beberapa proyek skala besar. Inverter yang dipilih dalam penelitian merupakan inverter pabrikan Huawei dengan tipe SUN2000-100KTL-M1 yang telah memenuhi sertifikasi tersebut dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Berdasarkan spesifikasi inverter yang digunakan, jumlah inverter yang dibutuhkan untuk memenuhi kapasitas PLTS apung skenario 1 dapat dihitung dengan Persamaan 7 sebagai berikut:

$$N_{Inv} = \frac{\text{Batasan Kapasitas PLTS}}{P_N} \quad (7)$$

Keterangan:

N_{Inv} = jumlah inverter yang dibutuhkan

P_N = kapasitas keluaran inverter

$$N_{Inv} = \frac{10.000.000 \text{ W}}{100.000 \text{ W}}$$

$$N_{Inv} = 100 \text{ unit}$$

Adapun total kapasitas inverter atau kapasitas PLTS (AC) dari sistem PLTS apung dapat dihitung dengan Persamaan 8 sebagai berikut:

$$P_{PV_AC} = P_N \times N_{Inv} \quad (8)$$

$$P_{PV_AC} = 100.000 \text{ w} \times 100$$

$$P_{PV_AC} = 10.000.000 \text{ W}$$

Berdasarkan komponen inverter yang digunakan, PLTS apung skenario 1 memiliki total kapasitas inverter sebesar 10.000.000 Watt atau 10 MW. Selanjutnya dengan menggunakan Persamaan 1 dengan DC/AC ratio sebesar 1,2, kapasitas PLTS (DC) dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{PVDC} = 1,2 \times 10.000.000 \text{ W}$$

$$P_{PVDC} = 12.000.00 \text{ Wp}$$

Tabel 3. Rangkuman kapasitas PLTS

No	Parameter	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
1.	Total Inverter	100 Unit	12 Unit	30 Unit
2.	Total Kapasitas Inverter	10.000.000 W	1.200.000 W	3.000.000 W
3.	Kapasitas PLTS (DC)	12.000.000 Wp	1.440.000 Wp	3.600.000 Wp

Dalam menghitung jumlah inverter, total kapasitas inverter, dan kapasitas PLTS (DC) untuk skenario 2 dan 3 dapat dilakukan menggunakan Persamaan 7, Persamaan 8 dan Persamaan 1. Adapun rangkuman kapasitas PLTS tiap skenario dapat dilihat pada Tabel 3.

4.6.2 Modul Surya

Modul surya yang digunakan merupakan modul surya berjenis monokristalin karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi. Dalam menentukan komponen modul surya, terdapat beberapa sertifikasi yang perlu dimiliki oleh pabrikan modul surya yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Standar sertifikasi modul [24]

No	Standar	Tentang
1.	IEC 61215	Pemeriksaan standar penuaan/degradasi untuk modul PV <i>Crystalline</i> .
2.	IEC 61730	Pemeriksaan standar untuk persyaratan tahan api menurut ANSI/UL 70.

Untuk proyek PLTS apung, terdapat sertifikasi tambahan yang perlu

dimiliki yaitu IEC 61701 tentang *salt-mist corrosion* [23]. Modul surya yang digunakan merupakan modul surya pabrikan Trina Solar dengan tipe TSM DE18M(II) 500 Wp yang telah memiliki standar sertifikasi tersebut dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi modul surya [32]

No	Parameter	Penjelasan	Satuan	Nilai
1.	P_{max}	Nilai daya <i>output</i> modul surya maksimum pada kondisi STC	Watt Peak	500
2.	V_{mpp}	Nilai tegangan pada daya <i>output</i> maksimum	Volt	42,8
3.	I_{mpp}	Nilai arus pada daya <i>output</i> maksimum	Ampere	11,69
4.	V_{oc}	Nilai tegangan sirkuit terbuka (belum terhubung dengan beban)	Volt	51,7
5.	I_{sc}	Nilai arus hubung singkat modul surya	Ampere	12,28

Dengan menggunakan modul surya Trina Solar dengan kapasitas 500 Wp, jumlah modul surya yang dibutuhkan untuk PLTS apung skenario 1 dapat dihitung menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut:

$$N_{Modul} = \frac{12.000.000 \text{ Wp}}{500 \text{ Wp}}$$

$$N_{Modul} = 24.000 \text{ unit}$$

Dengan menggunakan Persamaan 2, jumlah modul surya yang dibutuhkan untuk skenario 2 dan 3 adalah sebanyak 2.880 unit untuk skenario 2 dan sebanyak 7.200 unit untuk skenario 3.

Adapun dalam menentukan konfigurasi seri modul surya dalam suatu string dapat dilakukan perhitungan jumlah minimum modul surya yang dapat dihubungkan secara seri berdasarkan Persamaan 3 dan jumlah maksimum modul surya yang dihubungkan secara seri berdasarkan Persamaan 4 sebagai berikut:

$$N_{Modul_{max}} = \frac{1100V}{51,7}$$

$$N_{Modul_{max}} = 21,28 \approx 21 \text{ unit}$$

$$N_{Modul_{min}} = \frac{200V}{42,8}$$

$$N_{Modul_{min}} = 4,7 \approx 5 \text{ unit}$$

Selanjutnya perhitungan jumlah modul yang dapat dihubungkan secara paralel pada tiap MPPT *inverter* dapat dihitung berdasarkan Persamaan 5 sebagai berikut:

$$N_{String} = \frac{26 \text{ A}}{11,69 \text{ A}}$$

$$N_{String} = 2,22 \approx 2 \text{ unit}$$

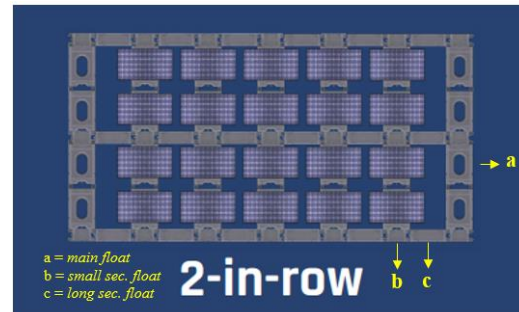
Berdasarkan perhitungan jumlah modul seri dan paralel, konfigurasi modul surya yang digunakan untuk masing-masing *inverter* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Konfigurasi modul tiap *inverter*

Parameter	Nilai	Satuan
Total Kapasitas Modul Surya tiap <i>inverter</i>	120	kilo Watt Peak
Jumlah Modul yang dibutuhkan	240	Unit
Jumlah Modul tiap String	20	Unit
Jumlah <i>String</i> Maksimum tiap MPPT	2	String
Jumlah Total <i>String</i>	12	String

4.6.3 Floater

Komponen *float* yang digunakan dalam penelitian merupakan *float* berjenis *High Density Polyethylene* (HDPE) pabrikan Ciel et Terre yang memiliki *fixing system* dengan kemiringan 12° karena *float* berjenis HDPE dapat didaur ulang dan tahan terhadap sinar UV. Dalam penelitian ini, konfigurasi *float* yang digunakan merupakan konfigurasi *2-in-a-row* dimana tiap dua baris modul surya terdapat akses *walkway* yang dapat dilihat pada Gambar 8.



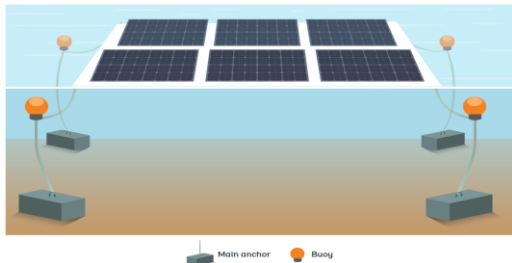
Gambar 8. Konfigurasi *2-in-a-row* [33]

Guna membagi beban tambatan PLTS apung untuk mengurangi resiko kerusakan pada keseluruhan sistem apabila terjadi kerusakan, PLTS apung dalam penelitian ini didistribusikan ke dalam beberapa *floating island*. Untuk mengetahui ukuran maksimum suatu *floating island*, perlu dilakukan studi lebih lanjut melalui evaluasi *Finite Element Analysis* dan *Computational Fluid Dynamics* [23]. Dalam penelitian ini, PLTS apung skenario 1 didistribusikan ke dalam empat *floating island*, PLTS apung skenario 2 didistribusikan ke dalam dua *floating*

island dan untuk sistem PLTS apung skenario 3 didistribusikan ke dalam dua floating island

4.6.4 Anchoring dan Mooring

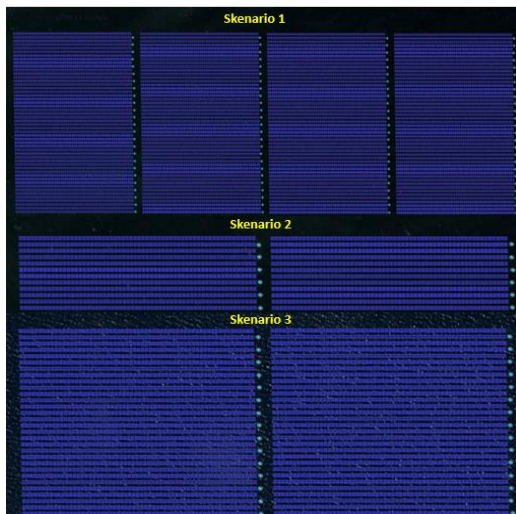
Danu Batur merupakan badan air alami dengan kedalaman maksimum sekitar 73 m. Berdasarkan rencana peletakan PLTS apung pada Gambar 6, lokasi PLTS apung cukup jauh dari tepi danau dan banyak KJA di sekeliling danau sehingga tidak memungkinkan melakukan anchoring ke tepi danau. Oleh karena itu, sistem anchoring yang digunakan adalah sistem bottom anchoring atau penjangkaran ke dasar perairan yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Sistem bottom anchoring [23]

4.7 Penggambaran Peletakan PLTS

Dalam penelitian ini juga dilakukan penggambaran peletakan PLTS apung di Danau Batur menggunakan helioscope. Penggambaran dilakukan berdasarkan konfigurasi 2-in-a-row dengan masing-masing baris modul terdiri atas 60 modul. Adapun penggambaran peletakan PLTS apung dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Layout PLTS apung

4.8 Analisa Hasil Simulasi Produksi

Tabel 6. Hasil simulasi PLTS apung

No	Parameter	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
1.	Kapasitas PLTS (Wp)	12.000.000	1.440.000	3.600.000
2.	Produksi Energi Tahun Pertama (kWh/tahun)	20.671.138	2.539.018	6.331.304
3.	Performance Ratio (%)	79,96	81,85	81,64

Dalam mensimulasikan produksi energi menggunakan software PVsyst, parameter yang digunakan diantaranya plane tilt sesuai dengan fixing system floater yaitu 12°, azimuth bernilai 0, konfigurasi sistem tiap inverter seperti pada Tabel 5. Untuk memodelkan efek pendinginan pada sistem PLTS apung, penelitian ini menggunakan parameter thermal loss factor atau u-value sebesar 31 W/m²K sebagai nilai u-value untuk floater berjenis HDPE [27]. Adapun rangkuman hasil simulasi PLTS apung dapat dilihat pada Tabel 6. Nilai PR tiap skenario telah berada direntang best practice PR yaitu sebesar 75-85% [25] dengan skenario 2 yang memiliki nilai PR tertinggi. hasil simulasi juga menunjukkan losses akibat far shading hanya berkontribusi sebesar -0,59%.

Tabel 7. Perbandingan performa PLTS apung dan ground mounted

Skenario 1			
Parameter	Sistem Pemasangan PLTS		Persentase Peningkatan (%)
	Floating PV	Ground Mounted	
Thermal Loss Factor (W/m ² K)	31	29	6,89
Produksi Energi Tahun Pertama (kWh)	20.671.138	20.603.911	0,32
Performance Ratio (%)	79,96	79,58	0,47
PV Loss due to temperature (%)	-5,44	-5,86	7,16
Skenario 2			
Parameter	Sistem Pemasangan PLTS		Persentase Peningkatan (%)
	Floating PV	Ground Mounted	
Thermal Loss Factor (W/m ² K)	31	29	6,89
Produksi Energi Tahun Pertama (kWh)	2.539.018	2.530.813	0,32
Performance Ratio (%)	81,85	81,46	0,47
PV Loss due to temperature (%)	-5,44	-5,86	7,16
Skenario 3			
Parameter	Sistem Pemasangan PLTS		Persentase Peningkatan (%)
	Floating PV	Ground Mounted	
Thermal Loss Factor (W/m ² K)	31	29	6,89
Produksi Energi Tahun Pertama (kWh)	6.331.304	6.310.061	0,33
Performance Ratio (%)	81,64	81,24	0,49
PV Loss due to temperature (%)	-5,44	-5,86	7,16

Dengan menggunakan nilai u-value untuk PLTS ground-mounted sebesar 29

W/m²K yang didefinisikan oleh PVsyst, didapatkan hasil PLTS apung tiap skenario memiliki performa produksi yang lebih baik yang dapat dilihat pada Tabel 7. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai *u-value* pada PLTS apung yang lebih tinggi sehingga sistem PLTS apung mampu melepaskan panas ke lingkungan lebih baik.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan mengacu pada rencana pemanfaatan Danau Batur dan regulasi pemanfaatan PLTS apung, Danau Batur memiliki potensi teknis untuk pemanfaatan PLTS apung sebesar 76,44 MWp.
2. Berdasarkan hasil perancangan didapatkan kapasitas PLTS apung skenario 1 sebesar 12 MWp, kapasitas PLTS apung skenario 2 sebesar 1,44 MWp, dan kapasitas PLTS apung skenario 3 sebesar 3,6 MWp.
3. Berdasarkan hasil simulasi produksi ketiga skenario kapasitas PLTS apung memiliki nilai *performance ratio* yang berada pada rentang *best practice performance ratio* dengan performa tertinggi ditunjukkan oleh skenario 2 sebesar 81,85%.
4. Jika dibandingkan dengan sistem PLTS *ground mounted*, sistem PLTS apung menunjukkan adanya peningkatan performa produksi, *performance ratio* dan juga *losses* akibat temperatur.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Anggiat Situmorang, I. A. Dwi Giriantari, and I. N. Setiawan, "Perancangan Plts Atap Gedung Perpustakaan Universitas Udayana," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 9, no. 2, p. 89, 2022, doi: 10.24843/spektrum.2022.v09.i02.p11.
- [2] Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional
- [3] Peraturan Daerah Provinsi Bali Nomor 9 Tahun 2020 Tentang Rencana Umum Energi Daerah Provinsi Bali Tahun 2020-2050.
- [4] Peraturan Gubernur Bali Nomor 45 Tahun 2019 Tentang Bali Energi Bersih
- [5] IESR, Indonesia Energy Transition Outlook 2023
- [6] A. A. G. A. Pawitra Putra, I. N. S. Kumara, and W. G. Ariastina, "Review Perkembangan PLTS di Provinsi Bali Menuju Target Kapasitas 108 MW Tahun 2025," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 19, no. 2, p. 181, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i02.p09.
- [7] I. P. A. Wiranata, I. N. S. Kumara, and I. W. Sukerayasa, "Simulasi Unjuk Kerja Plts 1 MW Kayubih Jika Menggunakan Sun Tracking System," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 4, pp. 7–14, 2019.
- [8] Kementerian ESDM, "Menengok Ladang Panel Surya Terbesar di Indonesia," 2020. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/03/13/2508/menengok.ladang.panel.surya.terbesar.di.indonesia?lang=en> (accessed Jul. 16, 2023).
- [9] I. N. S. Kumara, M. Ashari, A. S. Sampeallo, and A. A. G. A. Pawitra, "Simulated energy production and performance ratio of 5 MW grid-connected photovoltaic under tropical savannah climate in Kupang timor Island of Indonesia," *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 7, no. 2, pp. 117–129, 2017.
- [10] CORE, "Peta Jalan Pengembangan PLTS Atap: Menuju Bali Mandiri Energi Bersih,"
- [11] Direktorat Jenderal EBTKE, *Panduan Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya PLTS Terapung*. 2021.
- [12] Peraturan Menteri PUPR Nomor 6 Tahun 2020 tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan,
- [13] Direktorat Jenderal EBTKE, "PLTS Terapung Terbesar di Asia Tenggara Siap Dikembangkan,"

2020.
<https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/01/23/2463/plts.terapung.terbesar.di.asia.tenggara.siap.dikembangkan> (accessed Jul. 18, 2023).
- [14] W. B. Prasetyo, "Pertama di Indonesia, PLTS Terapung Bifacial Hadir di Danau UI - Tropical Renewable Energy Center," 2020. <https://trec.eng.ui.ac.id/info/pertama-di-indonesia-plts-terapung-bifacial-hadir-di-danau-ui/> (accessed Jul. 18, 2023).
- [15] Direktorat Jenderal SDA, *Laporan Karakteristik Danau dan Sarana Prasarana Penunjang Persiapan Penetapan Sempadan Danau Batur di Kabupaten Bangli*. 2022.
- [16] Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/map?s=-8.270612,115.394897&m=site&c=-8.254958,115.412108,11> (accessed Jul. 18, 2023).
- [17] Kementerian ESDM, "Panduan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," p. 84, 2020.
- [18] Bayuaji Kencana *et al.*, "Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *Indonesia Clean Energy Development II*, no. November, p. 68, 2018.
- [19] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, and R. Wennersten, "Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems," *Energy Procedia*, vol. 105, no. November 2018, pp. 1136–1142, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.483.
- [20] M. Acharya and S. Devraj, "Floating Solar Photovoltaic (FSPV): A Third Pillar to Solar PV Sector?," *TERI Discussion Paper: Output of the ETC India Project (New Delhi: The Energy and Resources Institute)*, p. 68, 2019, [Online]. Available: www.teriin.org
- [21] B. Ramadhani, *Buku Instalasi PLTS Dos & Don ' ts*. 2018.
- [22] D. Haning and I. Askolani, "Buku Pegangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya," 2020.
- [23] E. and S. World Bank Group, "Where Sun Meets Water," *Where Sun Meets Water*, 2019, doi: 10.1596/32804.
- [24] M. Gumintang, M. Sofyan, and I. Sulaeman, "Design and Control of PV Hybrid System in Practice," *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, pp. 1–122, 2020, [Online]. Available: www.giz.de
- [25] K. Mertens, *Photovoltaics : Fundamentals, Technology and Practice*. 2014.
- [26] W. S. Ebhota and P. Y. Tabakov, "Influence of photovoltaic cell technologies and elevated temperature on photovoltaic system performance," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 7, p. 101984, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.101984.
- [27] S. Oliveira-Pinto and J. Stokkermans, "Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies," *Energy Convers Manag*, vol. 211, no. November 2019, p. 112747, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112747.
- [28] Peraturan Daerah Kabupaten Bangli Nomor 9 Tahun 2013 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Bangli Tahun 2013 – 2033.
- [29] Peraturan Direksi PT PLN (Persero) No 0357.K/DIR/2014 tentang Pedoman Penyambungan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PLN.
- [30] Peraturan Direksi PT PLN (Persero) No 0064.P/DIR/2019 tentang Pedoman Penyambungan Pembangkit Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PT PLN (Persero)".
- [31] "Huawei." <https://solar.huawei.com/en/>
- [32] "Trina Solar." <https://www.trinasolar.com/en-glb>
- [33] "Ciel et Terre." <https://ciel-et-terre.net/>