

## Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia

Mujammil Asdhiyoga Rahmanta\*, Agussalim Syamsuddin, Fefria Tanbar, Natalina Damanik

Bidang Riset & Teknologi Sistem Pembangkitan & Energi,  
PT. PLN (Persero) Pusat Penelitian & Pengembangan Ketenagalistrikan

\*Corresponding author email: mujammil1 @pln.co.id

### Abstrak

Pembangkit listrik energi terbarukan (ET) dapat mengurangi penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang merusak lingkungan terkait dengan emisi CO<sub>2</sub>. Photovoltaic (PV) adalah suatu alat yang dapat mengubah energi surya (foton) menjadi listrik arus searah yang merupakan salah satu komponen dalam Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS). Karakteristik techno ekonomi PV sangat mempengaruhi Levelized Cost of Energy (LCOE) dari PLTS. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan teknologi PV dan pemanfaatannya di Indonesia. Metode tinjauan Pustaka yang komprehensif dilakukan dalam penelitian ini. Dari hasil diskusi dan pembahasan disimpulkan bahwa teknologi PV jenis monokristalin memiliki tren pemakaian yang relatif tinggi karena efisiensi/kinerja relatif tinggi, kemudahan fabrikasi, sifat ramah lingkungan, & kehandalan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrim (umur operasional lama). Potensi energi surya terbesar di Indonesia terdapat di sekitar wilayah Nusa Tenggara Timur dengan nilai direct normal irradiation sebesar 5 kWh/m<sup>2</sup>. PLTS berpotensi untuk dibangun di luar Jawa Bali Sumatera mengacu pada tingginya LCOE setempat sehingga nilai feed in tariff yang digunakan dalam kontrak jual beli listrik dapat bersaing dengan nilai LCOE PLTS.

Kata kunci : Energi terbarukan, Photovoltaic (PV), LCOE

### Abstract

Renewable energy (RE) power generation can reduce the use of environmentally damaging fossil fuel-fired power plants associated with CO<sub>2</sub> emissions. Photovoltaic (PV) is a device that can convert solar energy (photons) into direct current electricity which is one of the components in a Solar Power Center (SPC). The techno-economic characteristics of PV greatly affect the Levelized Cost of Energy (LCOE) of SPC. This study aims to analyze the development of PV technology and its utilization in Indonesia. A comprehensive literature assessment method was used in this study. From the results of the discussion and discussion, it is understood that monocrystalline PV technology has a relatively high usage trend due to relatively high efficiency/performance, ease of fabrication, environmentally friendly properties, & reliability against extreme environmental conditions (long operational life). The greatest potential for solar energy at Indonesia is found around the East Nusa Tenggara region with a direct normal irradiation value of 5 kWh/m<sup>2</sup>. SPC has the potential to be built outside Java Bali Sumatra referring to the high local LCOE so that the feed in tariff value used in the power purchase contract can compete with the SPC LCOE.

Keywords: Renewable energy, Photovoltaic (PV), LCOE

### I. Pendahuluan

Isu emisi terkait perkembangan teknologi global yang meresahkan negara-negara dunia telah memicu kesepakatan Paris oleh 196 negara. Salah satu tujuan dari Perjanjian Paris adalah untuk memperkuat respon global terhadap isu-isu perubahan iklim dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan upaya memerangi kemiskinan (United Nations, 2015). Perubahan iklim dan peningkatan suhu bumi disebabkan oleh gas rumah kaca, seperti CO<sub>2</sub> dari emisi pembangkit listrik. Pembangkit listrik yang bersumber dari bahan bakar fosil menyumbang 33-40% dari emisi CO<sub>2</sub> dunia. Pusat listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara adalah kontributor utama emisi ini (Sekoai & Yoro, 2016; Zhang, 2016). Di tahun 2020, proses pembangkitan tenaga listrik global masih didominasi oleh pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi dari batubara dan gas

bumi masing-masing sebesar 25% dan 23%, sementara itu energi terbarukan sebesar 29%, serta nuklir sebesar 10%. Tren pemakaian energi terbarukan di tenaga listrik telah meningkat dari 20% di tahun 2010 menjadi 29% pada tahun 2020 (IEA, 2022a). Pembangkit listrik hidro masih mendominasi bauran energi terbarukan sebesar 53%, diikuti oleh angin sebesar 23%, dan surya *Photovoltaic* (PV) sebesar 12% pada tahun 2021. Bauran solar PV dalam komposisi pembangkit listrik energi terbarukan naik signifikan, yaitu 1% pada tahun 2010 menjadi 12% pada tahun 2021 (IEA, 2022b). Kenaikan penggunaan solar PV ini terjadi seiring dengan penurunan *levelized cost of energy* (LCOE), dimana LCOE solar PV turun dari 41 USD Cent/kWh di tahun 2010 menjadi 4,5 USD Cent/kWh di tahun 2020. Selain itu, terjadi

## Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia

penurunan biaya investasi dan kenaikan *capacity factor* solar PV pada periode tersebut (IRENA, 2021).

Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki kesulitan untuk membangun sistem interkoneksi ketenagalistrikan antar pulau. Sistem interkoneksi antar pulau yang besar hanya terdapat di pulau Jawa, Bali, dan Madura dimana beban listrik di pulau Jawa mencapai lebih dari 70% kelistrikan nasional. Pertumbuhan kebutuhan listrik Indonesia sekitar 3,5%/tahun dari tahun 2015 hingga 2020. Pada tahun 2020, kapasitas terpasang pembangkit listrik Indonesia sebesar 61,13 GW. Lebih dari 50% pasokan listrik Indonesia berasal dari pembangkit listrik tenaga batubara (PLTU) (MEMR, 2021a; PT. PLN (Persero), 2022). Pemanfaatan Energi terbarukan (ET) di Indonesia masih sangat rendah, dimana prosentase utilisasi geothermal masih 6,31% dari potensinya sebesar 29.544 MW, hydro sebesar 6% dari potensi sebesar 85.476 MW, energi matahari dan angin masih dibawah 1% pada tahun 2021 (MEMR, 2021a; PT. PLN (Persero), 2022). Masalah yang dihadapi oleh sistem kelistrikan yang menggunakan ET seperti angin & surya adalah produksi energi yang terputus-putus (*intermittency*) karena sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Gross & Green, 2016; Suchet et al., 2020). Karakteristik energi terbarukan yang berselang-seling menjadi penghambat peningkatan penetrasi energi terbarukan di jaringan listrik. Hal ini karena keluaran energi angin dan matahari yang tidak menentu yang disebabkan oleh variasi kecepatan angin dan radiasi matahari sehingga menimbulkan tantangan pada sistem kelistrikan, misalkan ketidakstabilan frekuensi (Bozalakov et al., 2019; Dimitar V. Bozalakov, Joannes Laveyne & Jan Van de Vyver, 2020; Rahimi et al., 2013). Untuk mengatasi hal tersebut, mitigasi pola operasi dengan menggabungkan energi terbarukan dengan pembangkit listrik tenaga diesel/gas telah banyak dilakukan. Pemasangan baterai dapat dilakukan, tetapi biaya investasi yang relatif tinggi dapat meningkatkan produksi listrik (Rahimi et al., 2013)

Dalam rangka meningkatkan penetrasi ET, Pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 minimal 23% dan 31% pada tahun 2050 (Government Regulation of the Republic of Indonesia Number 79 of 2014 Concerning National Energy Policy, 2014). Skema *feed in tariff* ataupun model bisnis PV *rooftop* dikeluarkan dalam upaya meningkatkan penetrasi ET. Penelitian ini bertujuan untuk mereview perkembangan teknologi solar PV baik aspek teknis dan ekonomis serta kesesuaiannya dengan pasar di Indonesia

## II. Metode

Dilakukan tinjauan pustaka yang luas terkait dengan perkembangan teknologi solar PV baik aspek teknologi, ekonomi, dan kondisi pasar di Indonesia serta kebijakan pemerintah untuk mendukung pemanfaatan PV.

## III. Diskusi & Pembahasan

### A. Pusat Listrik Tenaga Surya

*Photovoltaic* (PV) adalah suatu alat yang dapat mengubah energi surya (foton) menjadi listrik arus searah. Kemudian listrik arus searah diubah menjadi arus bolak-balik sesuai dengan sistem tegangan dan frekuensi setempat. Suatu Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki komponen utama yaitu: panel surya (PV), *inverter* dan baterai (Boxwell, 2012). PLTS tidak memiliki daya konstan (*noncapacity value generation system*) karena kapasitas keluarannya tergantung pada tingkat radiasi matahari yang selalu berubah setiap waktu. PLTS dinilai dari seberapa banyak energi yang bisa dihasilkan, bukan seberapa besar dayanya, kecuali pada sistem yang memiliki *storage system*. Oleh sebab itu, kapasitas suatu PLTS ditentukan oleh besarnya konsumsi energi suatu beban dalam suatu periode, yaitu dengan menggunakan harga rata-rata suatu beban pada suatu lokasi dalam periodenya. Kapasitas komponen utama ditentukan sesuai tipe dan desain dari PLTS yang akan dibangun. Pada sistem PLTS, menghitung kapasitas masing-masing komponen atau disebut juga *sizing*, sangat penting karena jika kapasitas komponen terlalu kecil, maka sistem tidak dapat memenuhi kebutuhan energi yang diinginkan, tetapi jika kapasitasnya terlalu besar, maka biaya untuk PLTS akan sangat besar. Sistem PLTS memiliki komponen utama yaitu: modul surya, *inverter/power conditioner unit* (PCU), *solar charge controller* (SCC)/*battery charge controller* (BCC) dan *storage system* (*Battery*) (Sianipar, 2014).

Kebutuhan kapasitas (kWp) panel surya ditentukan oleh besar energi (kWh) yang dibutuhkan beban dalam satu periode dan tingkat radiasi matahari di lokasi. Beberapa faktor dapat mempengaruhi efisiensi panel seperti temperatur, koneksi kabel, inverter, baterai, dan lain-lain, sehingga secara praktek hasil perhitungan yang diperoleh dikoreksi dengan faktor derating yang umumnya sekitar 0,67%. Kapasitas kWp dihitung dengan rumus (Boxwell, 2012) sebagai berikut:

$$kWp = \frac{I_0}{H_0} \cdot \frac{E_0}{\eta_{sm}} \cdot C_f = \frac{E_0}{PSH \times \eta_{sm}} \cdot C_f \quad (1)$$

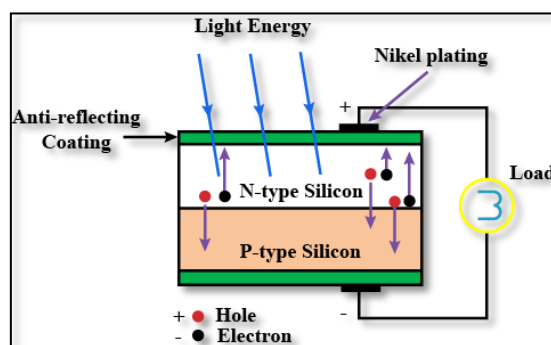
Dimana  $E_0$ : energi yang ingin diproduksi (kWh),  $H$ : tingkat radiasi matahari di lokasi (kWh/m<sup>2</sup>/hari),  $I_0$ : standard iradiasi (1 kW/m<sup>2</sup>),  $\eta_{sm}$ : efisiensi sistem modul (%),  $C_f$ : faktor koreksi

temperatur (1,1 – 1,5), PSH: *peak sun hour* (jam/hari) minimum dalam periode,  $\eta$ : efisiensi total sistem (0,67 – 0,75). Untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan, modul surya disusun secara berderet yang disebut *string*. Untuk mendapatkan daya/arus yang diinginkan, *string* modul surya disusun secara paralel. Besarnya tegangan *string* disesuaikan dengan tegangan masukan *inverter*.

## B. Tipe Solar PV

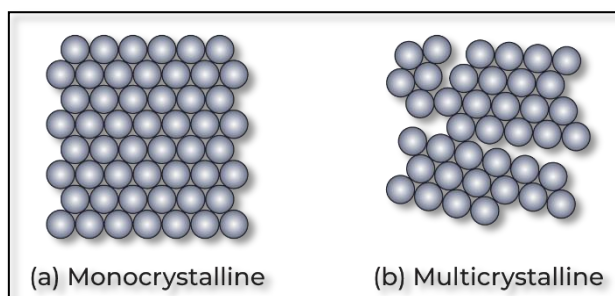
### 1. Wafer-based Solar Technology

Sel surya tersusun dari satu lapisan zat penyerap cahaya (*single-junction*) atau beberapa gabungan (*multi-junction*) untuk menjalankan fungsi penyerapan dan pemisahan muatan yang berbeda. Sel berbasis *wafer* generasi pertama terdiri dari silikon kristal, contohnya adalah monokristalin dan polikristalin. Permukaan atas sel dibuat dengan menggunakan lapisan tipis bahan tipe-p untuk menyerap cahaya. Cincin logam diposisikan di sekitar bahan tipe-p dan tipe-n yang masing-masing berfungsi sebagai terminal positif dan negative (Rathore et al., 2021; Zhao et al., 1998). Bahan semikonduktor membentuk unit tunggal sel PV seperti yang ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Teknologi solar berbasis wafer (toppr, 2022)

### Monocrystalline & Polycrystalline Solar Cell



Gambar 2. Susunan PV *monocrystalline* dan *polycrystalline* (AE Solar, 2003)

Sel surya *monocrystalline* dibuat menggunakan kristal tunggal silikon (Si) dengan proses Czochralski memiliki efisiensi sekitar 16% (Kenu E. Sarah, 2020). Sementara itu, modul PV *polycrystalline* dibentuk dari berbagai kristal, yang kemudian digabungkan menjadi satu unit sel seperti terlihat pada gambar 2. Sel surya Polycrystalline Si mewakili yang paling umum di antara yang lain, mencapai 48% dari total yang diproduksi pada tahun 2008 (In et al., 2018; Saga, 2010).

### 2. Thin Film Technology

Teknologi ini merupakan teknologi sel PV generasi kedua yang terdiri dari *Amorphous Silicon*, *Cadmium Telluride* (CdTe) dan *Copper Indium*

*Gallium di-Selenide* (CIGS). Teknologi ini sudah digunakan secara komersial terkait kinerja yang lebih baik dalam kondisi lingkungan yang berawan (Powalla et al., 2017).

### Amorphous Silicon Solar Cell (A-Si)

Jenis sel surya ini telah dipasarkan lebih dari 15 tahun dan paling dikenal di antara tipe thin films. Sel PV jenis ini umumnya digunakan dalam kalkulator saku dan desktop, dan saat ini telah digunakan pada panel surya untuk pembangkit listrik. Modul A-Si diproduksi dengan menempatkan lapisan tipis uap silikon (tebal sekitar 1  $\mu\text{m}$ ) pada bahan substrat seperti kaca atau logam. Tingkat efisiensi sel surya A-Si relatif tetap di kisaran 8,1%. Keunggulan utama

## **Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia**

sel surya silikon amorf terletak pada biaya produksi yang jauh lebih rendah (Powalla et al., 2017; Yang, 2018).

### *Cadmium Telluride (CdTe)*

Sel PV jenis ini terbentuk dari *Cadmium Telluride*, yang berupa lapisan semikonduktor tipis yang dirancang untuk menangkap dan mengubah sinar matahari menjadi listrik. Sel PV jenis *Cadmium Telluride* adalah satu-satunya teknologi *thin film* yang memiliki biaya lebih rendah daripada sel surya tradisional yang diproduksi dengan silikon kristal dalam skala multi-kilowatt. Peningkatan efisiensi CdTe yang paling menonjol terjadi dari tahun 2013 hingga 2014 ketika efisiensi sel meningkat hingga kisaran 20% dan efisiensi modul hingga 17% (Kaminski et al., 2014; Kato et al., 2001; Luque & Hegedus, 2003).

### *Copper Indium Gallium Di-Selenide (CIGS)*

CIGS adalah semikonduktor yang terdiri dari: *Copper* (tembaga), *Indium*, *Gallium* dan *Selenium*. CIGS memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada CdTe (rata-rata sekitar 10% - 12%), bahkan beberapa di antaranya bisa mencapai efisiensi hingga 22,8%, sehingga dapat bersaing dengan sel surya berbasis wafer crystal Silicon (c-Si) (Ong et al., 2018; Ramanujam & Singh, 2017).

### 3. Sel solar generasi ke tiga

Teknologi *thin film* yang baru muncul dikelompokkan ke dalam teknologi surya generasi ketiga, dimana mayoritas dari tipe ini belum tersedia secara komersial dan masih dalam tahap penelitian & pengembangan.

### *Nano Crystal Based Solar Cells*

Sel surya berbasis nanocrystal biasa disebut sel surya *Quantum Dot* (QD). Bahan ini termasuk semikonduktor, biasanya berasal dari kelompok logam transisi yang berukuran kisaran nanocrystal yang terdiri dari bahan semikonduktor, dan dapat mencapai efisiensi mencapai 16,6% (Gur & Science, 2006; Sagadevan, 2013).

### *Polymer Solar Cells (PSC)*

PSC dibangun dengan lapisan fungsional tipis yang terhubung secara serial yang dilapisi di atas *foil polymer*. Sel surya polimer memiliki efisiensi 6,5%, dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi karena ringan dan fleksibel, seperti jendela surya, tirai

surya, dan sebagainya (Gusain et al., 2019; Luceños & Mar, 2019).

### *Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)*

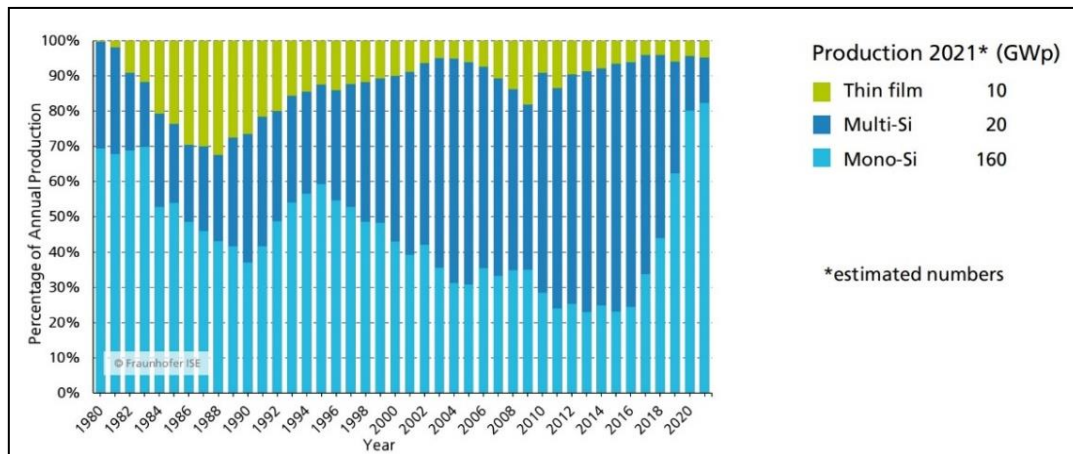
DSSC dibentuk dari empat bahan: elektroda semikonduktor (TiO<sub>2</sub> tipe n dan NiO tipe p), *sensitizer* pewarna, *mediator redox*, dan *counter electrode*. DSSC menarik karena kesederhanaannya dalam produksi, fleksibilitas dan biaya produksi yang lebih rendah. Karena sel solar ini dapat digunakan untuk membuat modul surya dengan warna yang menarik maka tipe ini lebih banyak diperuntukkan dalam aplikasi arsitektur hemat energi seperti jendela surya dan dinding kaca bangunan. Terobosan sel surya DSSC dihasilkan dari fotosensitisasi lapisan TiO<sub>2</sub> dan pewarna optik yang menghasilkan efisiensi hingga lebih dari 10% (Gong et al., 2012; Hossam-Eldin, A. & Refaey, Mostafa & Farghly, 2015).

### *Perovskite Solar Cells (PSCs)*

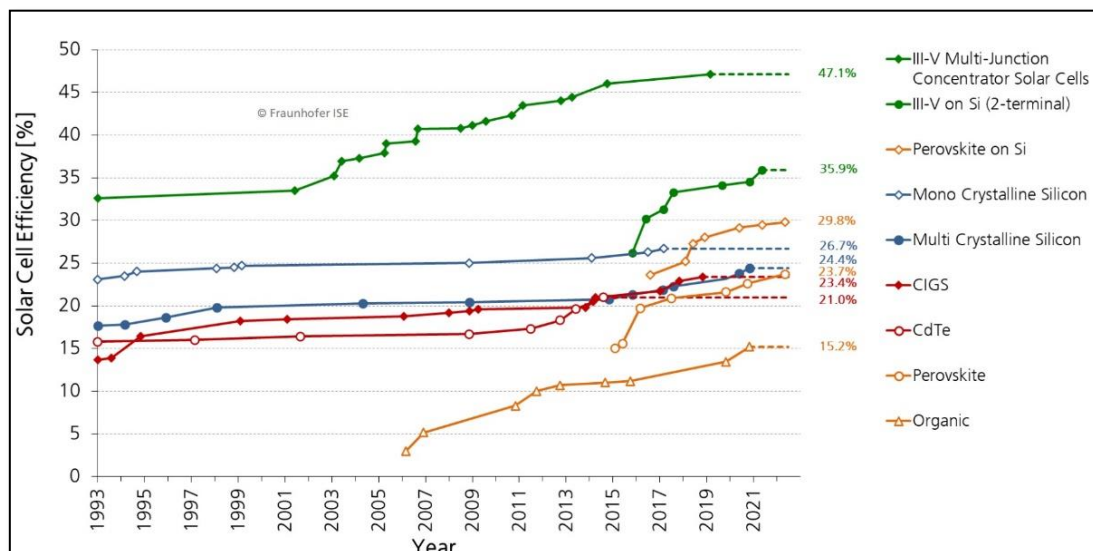
Bahan *perovskite* memiliki struktur oktahedral serta sifat optik, termal, dan elektromagnetik yang unik. Tingkat efisiensi dari konversi daya fotolistrik tipe ini tumbuh dari 3,8% pada 2009 menjadi 20,9% pada 2019, sehingga diproyeksikan dapat menggantikan sel surya Si konvensional di tahun-tahun mendatang (Zhou et al., 2018; Zhou H., 2014).

## **C. Tren perkembangan & kinerja teknologi PV**

Hingga tahun 2021 sekitar 94% dari pasar PV didominasi oleh panel polikristalin dan multikristalin, lima hingga enam persen diwakili oleh panel thin film. Sel silikon kristal memiliki harga yang lebih mahal sementara sel thin film lebih murah namun memiliki tingkat efisiensi yang lebih rendah (Benda & Černá, 2020; Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022). Hal tersebut terlihat pada gambar 3. Namun dengan peningkatan efisiensi dan penurunan harga, hal ini membuka peluang bagi pengembangan panel dengan jenis lain untuk bisa bersaing dengan sel silikon kristal. Dalam sistem PV efisiensi menjadi hal yang penting karena dalam aplikasinya pemilihan teknologi PV didasarkan pada analisis biaya pemasangan sistem PV dimana hal ini dipengaruhi oleh tingkat efisiensi dari panel. Selain itu faktor siklus hidup dalam sistem PV merupakan masalah yang sangat penting, sistem PV dengan siklus hidup yang panjang lebih disukai.



Gambar 3. Produksi PV berdasarkan jenisnya (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)



Gambar 4. Efisiensi berbagai jenis modul PV (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022)

Silikon kristal (c-Si) memiliki nilai yang kuat di pasar karena memiliki keunggulan antara lain kinerja tinggi, kemudahan fabrikasi, dan sifat ramah lingkungan. Selain itu, umur operasi yang panjang juga merupakan keuntungan yang cukup besar karena modul c-Si yang digunakan pada tahun 1970-an masih beroperasi. Panel kristal tunggal dapat menahan kondisi lingkungan yang berat yang biasa digunakan untuk perjalanan ruang angkasa. Namun demikian, c-Si memiliki kelemahan yaitu merupakan penyerap cahaya yang kurang baik, tidak fleksibel dan cukup rapuh ketika berada dalam struktur amorf yang tidak teratur. Beberapa dekade terakhir silikon kristal telah mengalami perkembangan yang lebih besar dalam hal efisiensi daripada *thin film* dan teknologi lain yang muncul. Saat ini, sel kristal

tunggal telah mencapai efisiensi 26,70% dalam kondisi STC (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022). Hal tersebut terlihat pada gambar 4. Biaya monokristalin dan polikristalin telah menurun dalam beberapa dekade terakhir, menjadikannya lebih unggul dari teknologi lainnya dengan tingkat efisiensi modul 19%–24%. Teknologi silikon memiliki biaya yang lebih tinggi dibanding dengan teknologi thin film, tapi memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi (ISE, 2021).

#### D. Aspek Ekonomi PV

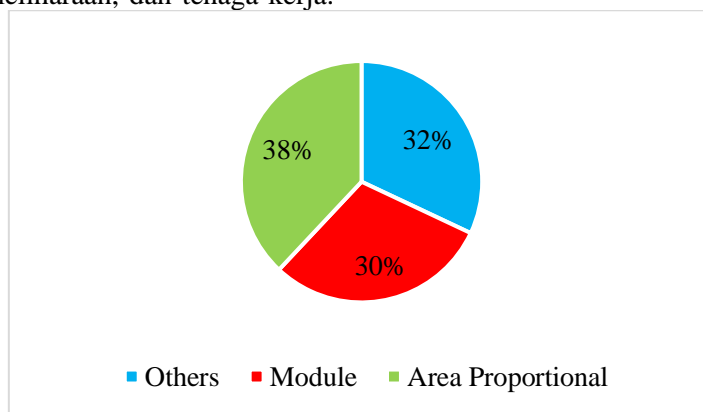
Harga modul PV dan strukturnya bervariasi berdasarkan teknologi. Gabungan antara biaya modul PV dan *Balance of system* (BOS) merupakan parameter yang digunakan untuk memperkirakan

## Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia

*capital cost* dari sebuah sistem PV. Biaya modul PV terdiri dari biaya sel PV, manufaktur, dan perakitan. BOS terdiri dari biaya struktur, sistem kelistrikan, dan storage. Inovasi dalam teknologi, *economies of scale*, dan pengalaman manufaktur menjadi alasan pengurangan biaya. Harga yang disebutkan untuk PV merupakan harga pabrik, untuk harga retail bervariasi antara 35% dan 45% lebih tinggi. Berdasarkan jenis pemasangan (di atap atau di tanah), biaya BOS bervariasi antara US\$1,60/W dan US\$1,85/W (Fthenakis & Kim, 2011). Harga modul PV kristal telah menurun dari US\$ 80/watt (W) pada tahun 1976 menjadi \$0,27/W pada tahun 2018. Harganya diperkirakan akan turun lebih jauh menjadi \$ 0,14/W pada tahun 2030 (BloombergNEF, 2019).

Biaya dari sebuah sistem PV terdiri dari *Cost of capital*, operasi, pemeliharaan, dan tenaga kerja.

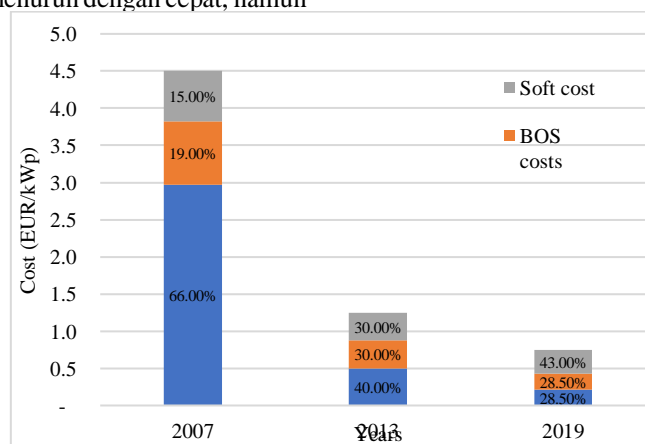
Di antara biaya ini, *cost of capital* yang terdiri dari biaya modul dan BOS memiliki pengaruh terbesar. Gambar 27 berikut menunjukkan contoh kasus perbandingan BOS antara modul kristalin dan modul thin film. *Capital expenditure* (Capex) memainkan peran penting dalam distribusi LCOE di seluruh dunia. Modul PV dengan efisiensi yang lebih tinggi dapat memiliki harga premium terkait kontribusinya dalam menurunkan biaya unit (per watt) komponen non-modul dalam sistem PV. Gambar 5 menunjukkan struktur sederhana dari biaya sistem PV. Kategori yang disebut sebagai *proportional area* mencakup pengeluaran untuk *racking*, tanah, konstruksi, transportasi, dll. *Others* mengacu pada biaya komponen elektronik yang dikutip dalam istilah *power*, bukan area, dan *soft cost* yang terkait dengan administrasi & *due diligence*.



Gambar 5. Struktur biaya sistem PV (Wang & Barnett, 2019)

Biaya investasi tidak hanya terdiri dari biaya modul dan komponen BOS (inverter, konstruksi, instalasi, pemantauan, dll), tetapi juga yang disebut dengan *soft cost* (perizinan, inspeksi, instalasi, interkoneksi ke grid, pajak). Gambar 6 merupakan struktur biaya sistem PV skala utilitas. Dengan perkembangan teknologi, biaya komponen modul dan BOS menurun dengan cepat, namun

tidak dengan *soft cost*. Dari tren ini maka *share of soft cost* dalam biaya investasi meningkat. Dalam kasus sistem PV skala perumahan, *share of soft cost* bahkan bisa lebih tinggi hingga 60%. *Soft cost* terkait dengan undang-undang sehingga sangat bervariasi dari satu negara ke negara lain.



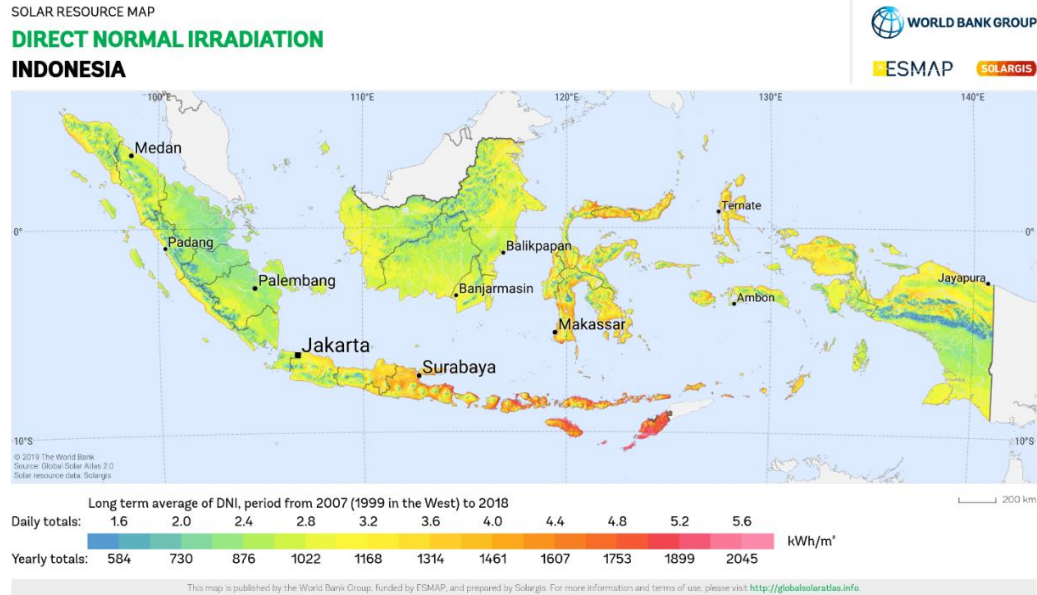


Gambar 6. Cost structure sistem PV skala utilitas (Benda & Černá, 2020)

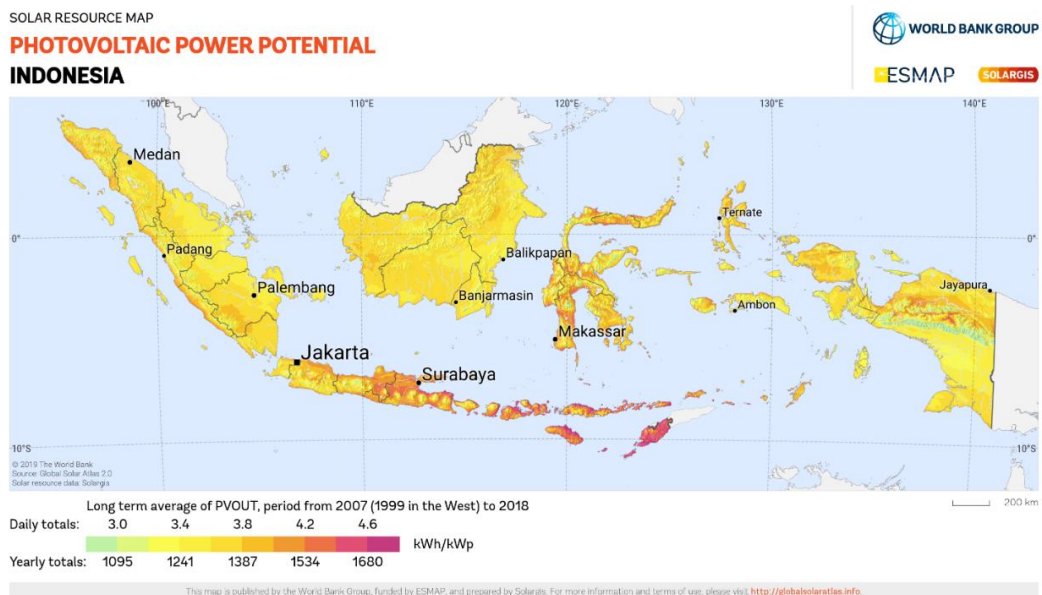
### E. Potensi Energi Surya di Indonesia

Direct normal irradiation (DNI) adalah jumlah iradiasi matahari yang diterima per satuan luas oleh permukaan bumi yang selalu tegak lurus atau normal terhadap sinar yang datang dalam garis

lurus dari arah matahari ( $\text{kWh/m}^2$ ). Gambar 7 di bawah ini menunjukkan besarnya nilai DNI dan lokasinya, terlihat bahwa nilai DNI terbesar terletak di sekitar wilayah Nusa Tenggara Timur (sekitar  $5 \text{ kWh/m}^2$ ).



Gambar 7. DNI di Indonesia dari 2007 sampai dengan 2018 (World Bank, 2019)



Gambar 8. Potensi PV di Indonesia dari tahun 2007 sampai dengan 2018 (World Bank, 2019)

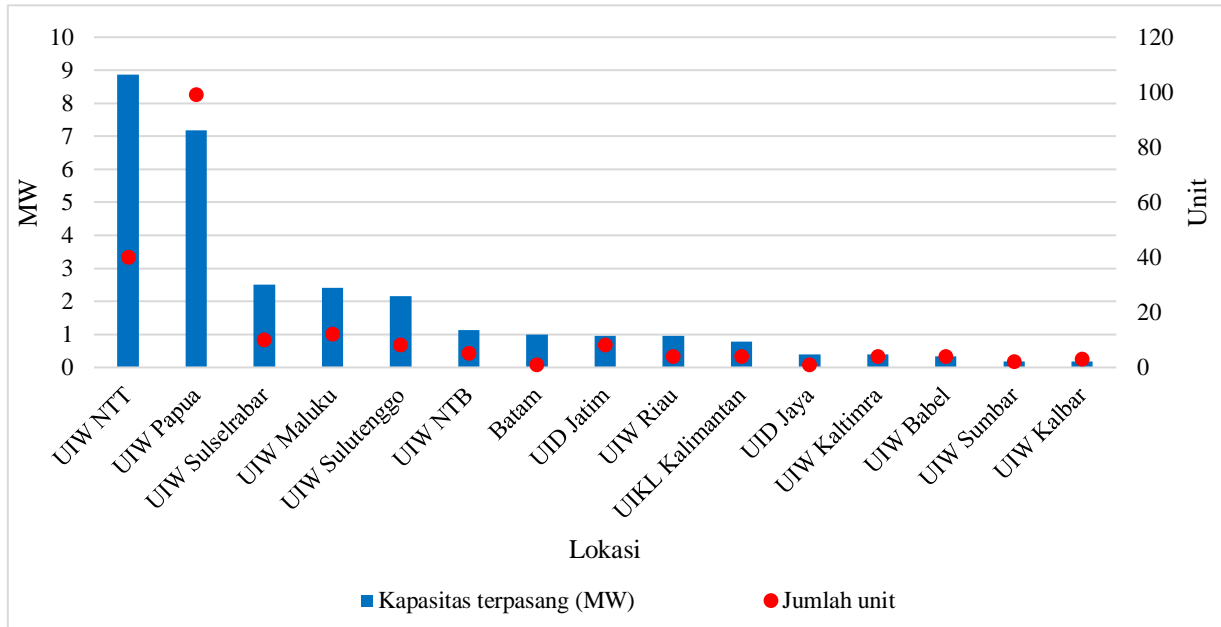
Sementara itu, potensi daya PV (PVOUT) di Indonesia terlihat pada gambar 8, dimana NTT memiliki nilai PVOUT tertinggi sekitar  $4,5 \text{ kWh/kWp}$ . PVOUT adalah output dari algoritma dan

data yang digunakan oleh (*SolarGIS*) untuk memastikan produksi energi potensial sistem energi matahari dari nilai tertinggi radiasi matahari. Kumpulan data utama yang digunakan untuk

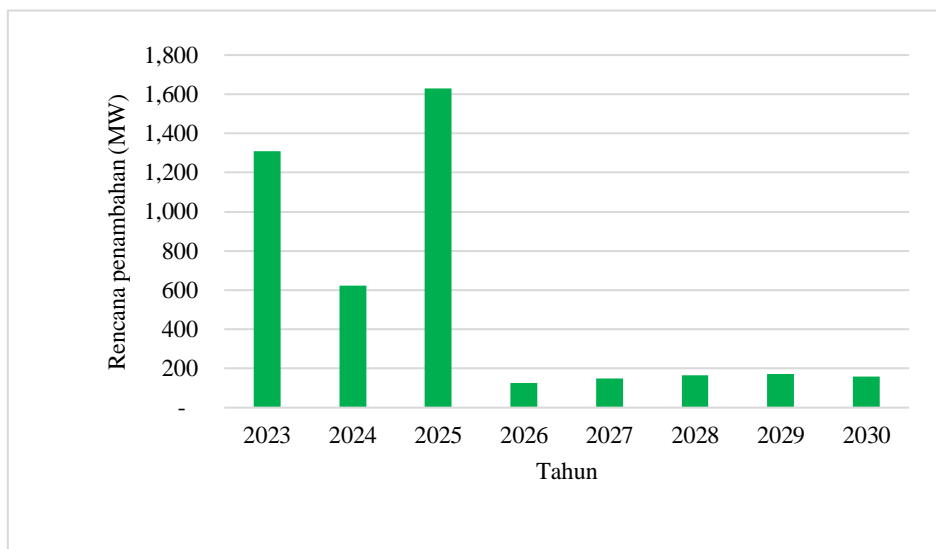
**Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV)  
Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia**

menghitung PVOUT menyediakan data *Global Tilted Irradiance* (GTI) dan suhu udara. Kumpulan

data ini merupakan hasil perhitungan tahunan dari tahun 1999 hingga 2018.



Gambar 9. Kapasitas terpasang PLTS di PT. PLN (Persero) tahun 2022 (PT. PLN (Persero), 2022)



Gambar 10. Rencana penambahan kapasitas PLTS (PLN & IPP) (PT. PLN (Persero), 2021)

**F. PLTS di Indonesia**

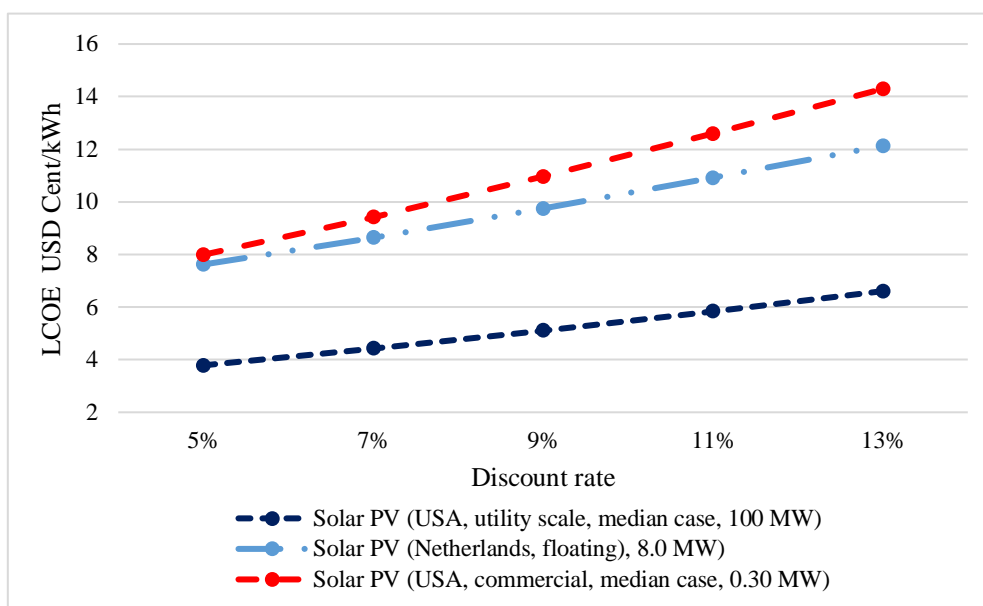
Pada tahun 2022, total PLTS yang tersambung dengan jaringan listrik PT. PLN (Persero) sebesar 29.42 MW dengan jumlah 205 unit. Kapasitas terpasang PLTS terbesar terletak di lokasi NTT dan Papua. Sementara itu, PT. PLN (Persero) terus

berupaya meningkatkan penambahan kapasitas PLTS di Indonesia seperti terlihat pada gambar 10 merupakan rencana penambahan kapasitas PLTS di PT. PLN (Persero). LCOE PLTS dengan tipikal daya 300 kW, nilai LCOE berkisar dari 8 USD Cent/kWh

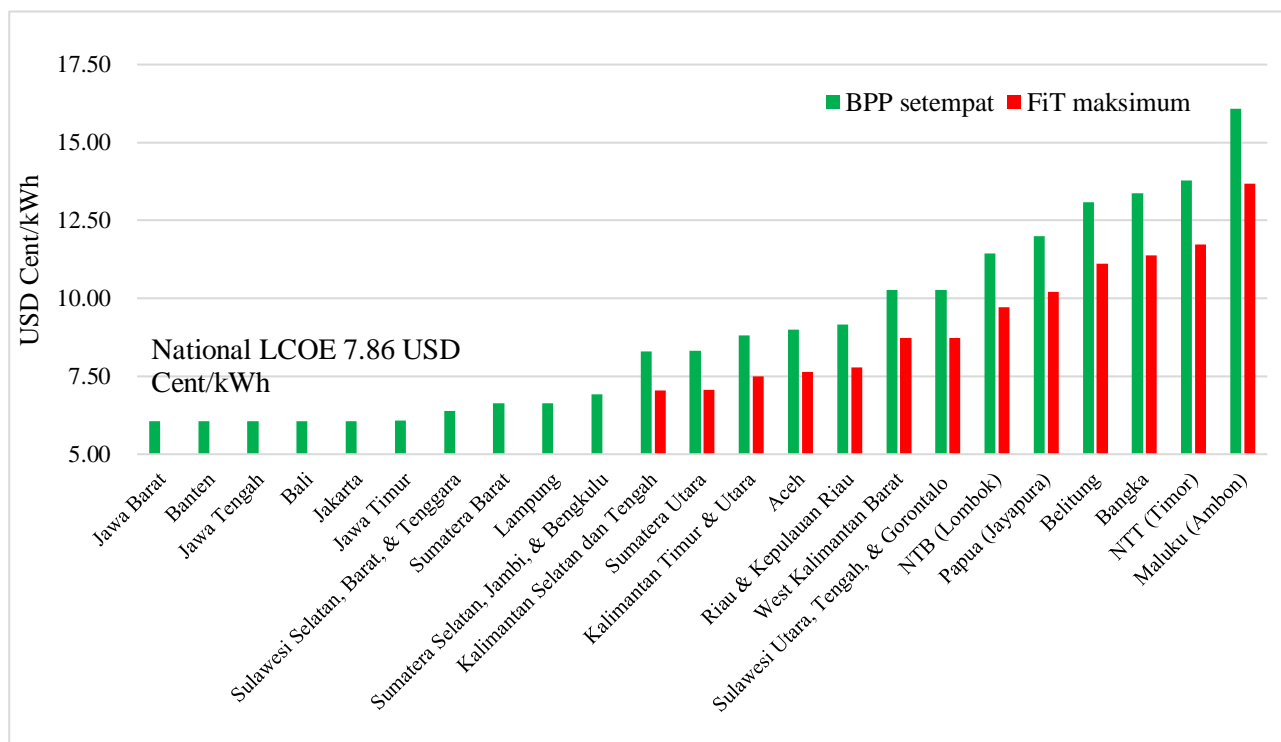


dengan nilai tingkat diskonto 5% terus naek menjadi sekitar 12 USD Cent/kWh dengan tingkat diskonto 13% terlihat pada gambar 11. Dengan nilai tersebut, nilai LCOE PLTS masih dibawah dari nilai kontrak perjanjian Jual beli tenaga listrik atau *power purchasing agreement* (PPA) yang mengacu pada *feed in tariff* pada Peraturan Menteri Energi & Sumber Daya Mineral No. 4 tahun 2020. Peraturan tersebut tertulis dalam pasal 5 ayat 3 dalam hal BPP

Pembangkitan di sistem ketenagalistrikan setempat di atas rata-rata BPP Pembangkitan nasional, harga pembelian tenaga listrik dari PLTS Fotovoltaik sebagaimana dimaksud pada ayat (1) paling tinggi sebesar 85% (delapan puluh lima persen) dari BPP Pembangkitan di sistem ketenagalistrikan setempat. Nilai LCOE setempat & nasional tenaga listrik terdapat pada gambar 12.



Gambar 11. LCOE Solar PV dalam beberapa nilai tingkat diskonto (IEA, 2023)



**Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV)  
Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia**

Gambar 12. LCOE setempat dan maksimum nilai FiT (MEMR, 2020, 2021b)

#### IV. Kesimpulan

Dari diskusi & pembahasan dapat disimpulkan bahwa teknologi PV jenis monokristalin memiliki tren pemakaian yang rekatif tinggi karena efisiensi/kinerja relatif tinggi, kemudahan fabrikasi, sifat ramah lingkungan, & kehandalan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrim (umur operasional lama). Potensi energi surya terbesar terdapat di sekitar wilayah Nusa Tenggara Timur dengan nilai *direct normal irradiation* sebesar 5 kWh/m<sup>2</sup>. PLTS berpotensi untuk dibangun di luar Jawa Bali Sumatera mengacu pada nilai *feed in tariff* yang dapat bersaing dengan nilai LCOE PLTS.

#### V. Daftar Pustaka

- AE Solar. (2003). *Photovoltaic modules operation in different weather conditions*. <https://ae-solar.com/solar-panels-in-different-weather/>
- Benda, V., & Černá, L. (2020). PV cells and modules – State of the art, limits and trends. *Heliyon*, 6(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05666>
- BloombergNEF. (2019). *Global Solar Investment Report*. [https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif\\_enc/files/knowledge-documents/bnef\\_2019-10-30\\_isa-cif\\_report-final\\_002.pdf](https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/bnef_2019-10-30_isa-cif_report-final_002.pdf)
- Boxwell, M. (2012). *Solar electricity handbook A simple, practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems*.
- Bozalakov, D., Mnati, M. J., Laveyne, J., & Desmet, J. (2019). Battery Storage Integration in Voltage Unbalance and Overvoltage Mitigation Control Strategies and Its Impact on the Power Quality. *Energies*, 12. <https://doi.org/10.3390/en12081501>
- Dimitar V. Bozalakov, Joannes Laveyne, M. J. M., & Jan Van de Vyver, L. V. (2020). Possible Power Quality Ancillary Services in Low-Voltage Grids Provided by the Three-Phase Damping Control Strategy. *Applied Sciences*, 10. <https://doi.org/10.3390/app10217876>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (2022). *Photovoltaics report*. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), 1609–1628. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>
- Gong, J., Liang, J., & Sumathy, K. (2012). *Review on dye-sensitized solar cells ( DSSCs ) : Fundamental concepts and novel materials*. 16, 5848–5860.
- Gross, R., & Green, T. (2016). *The Costs and Impacts of Intermittency*: Imperial College London.
- Gur, I., & Science, E. (2006). *Nanocrystal Solar Cells Nanocrystal Solar Cells*.
- Gusain, A., Faria, R. M., & Miranda, P. B. (2019). *Polymer Solar Cells — Interfacial Processes Related to Performance Issues*. 7(February). <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00061>
- Hossam-Eldin, A. & Refaey, Mostafa & Farghly, A. (2015). A Review on Photovoltaic Solar Energy Technology and its Efficiency. *Conference: 17th International Middle-East Power System Conference (MEPCON'15)*.
- IEA. (2022a). *Electricity sector emissions reached their highest-ever level in 2021*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-mix-2010-2020>
- IEA. (2022b). *Renewable Electricity*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>
- IEA. (2023). *Levelised Cost of Electricity Calculator*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator>
- In, C. C., Se, G., Kato, T., Wu, J., Hirai, Y., Sugimoto, H., & Bermudez, V. (2018). Record Efficiency for Thin-Film Polycrystalline Solar Cells Up to 22 . 9 % Achieved by. *IEEE Journal of Photovoltaics*, PP, 1–6. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2882206>
- IRENA. (2021). *RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2021*.

- [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2021\\_Summary.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021_Summary.pdf)
- ISE. (2021). Photovoltaics Report. *Fraunhofer ISE - PSE*, December. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- Kaminski, P. M., Lisco, F., & Walls, J. M. (2014). *Multilayer Broadband Antireflective Coatings for More Efficient Thin Film CdTe Solar Cells*. 4(1), 452–456.
- Kato, K., Hibino, T., Komoto, K., Ihara, S., Yamamoto, S., & Fujihara, H. (2001). *A life-cycle analysis on thin- $\mu\text{m}$  CdS / CdTe PV modules*. 67, 279–287.
- Kenu E. Sarah. (2020). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *International Journal of Engineering Research And*, V9(07), 741–749. <https://doi.org/10.17577/ijertv9is070244>
- Luceño-s, A., & Mar, A. (2019). *Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments*. <https://doi.org/10.3390/ijms20040976>
- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science*.
- MEMR. (2020). *Peraturan menteri nomor 4 Tahun 2020 tentang perubahan kedua atas peraturan menteri energi dan sumber daya mineral nomor 50 Tahun 2017 tentang pemanfaatan sumber energi terbarukan*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. <https://jdih.esdm.go.id/index.php/web/result/2032/detail>
- MEMR. (2021a). *National Electricity General Plan 2019–2038*. <https://jdih.esdm.go.id/index.php/web/result/1973/detail>
- MEMR. (2021b). *Regulation of MEMR No. 169.K.HK.02.MEM.M.2021 about LCOE of PT. PLN (Persero) 2020*.
- Ong, K. H., Agileswari, R., Maniscalco, B., Arnou, P., Kumar, C. C., Bowers, J. W., & Marsadek, M. B. (2018). *Review Article Review on Substrate and Molybdenum Back Contact in CIGS Thin Film Solar Cell*. 2018.
- Powalla, M., Paetel, S., Hariskos, D., Wuerz, R., Kessler, F., Lechner, P., Wischmann, W., & Friedlmeier, T. M. (2017). *Advances in Cost-Efficient Thin-Film Photovoltaics Based on Cu (In, Ga) Se 2*. *Engineering*, 3(4), 445–451. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.015>
- PT. PLN (Persero). (2021). *Diseminasi RUPTL 2021-2030*.
- PT. PLN (Persero). (2022). *PLN Statistics*.
- Rahimi, E., Rabiee, A., Aghaei, J., Muttaqi, K. M., & Esmaeel, A. (2013). *On the management of wind power intermittency*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28(x), 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.034>
- Ramanujam, J., & Singh, U. P. (2017). *Environmental Science solar cells – a review*. *Energy & Environmental Science*, 10, 1306–1319. <https://doi.org/10.1039/c7ee00826k>
- Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F., & Gama, A. (2021). *A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications*. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1200–1217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>
- Government Regulation of the Republic of Indonesia Number 79 of 2014 concerning National Energy Policy, (2014).
- Saga, T. (2010). *Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production*. 2(July), 96–102. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2010.82>
- Sagadevan, S. (2013). *Recent Trends on Nanostructures Based Solar Energy Applications : a Review*. 34, 44–61.
- Sekoai, P. T., & Yoro, K. O. (2016). *Biofuel Development Initiatives in Sub-Saharan Africa: Opportunities and Challenges*. <https://doi.org/10.3390/cli4020033>
- Sianipar, R. (2014). *Dasar perencanaan pembangkit listrik tenaga surya*. 11, 61–78.
- Suchet, D., Jeantet, A., Elghozi, T., & Jehl, Z. (2020). *Defining and Quantifying Intermittency in the Power Sector*. *Energies*(13), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en13133366>
- toppr. (2022). *Explain the construction and working*

**Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV)  
Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia**

of the solar cell.  
<https://www.toppr.com/ask/question/explain-the-construction-and-working-of-the-solar-cell/>

United Nations. (2015). *The Paris Agreement*.

Wang, X., & Barnett, A. (2019). The evolving value of photovoltaic module efficiency. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6).  
<https://doi.org/10.3390/app9061227>

World Bank. (2019). *PV Potential Indonesia*.  
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/indonesia>

Yang, T. C. (2018). *Transparent Conducting Aluminium Doped Zinc Oxide for Silicon Quantum Dot Solar Cell Devices in Third Generation Photovoltaics*. January 2016.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13188.22407>

Zhang, Z. (2016). *Making the Transition to a Low-*

*Carbon Economy: The Key Challenges for China: Transition to a Low-Carbon Economy Special Issue Making the Transition to a Low-Carbon Economy: The Key Challenges for China*. June. <https://doi.org/10.1002/app5.138>

Zhao, J., Wang, A., Green, M. A., & Ferrazza, F. (1998). 19.8% Efficient “Honeycomb” Textured Multicrystalline and 24.4% Monocrystalline Silicon Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 73(14), 1991–1993.  
<https://doi.org/10.1063/1.122345>

Zhou, D., Zhou, T., Tian, Y., Zhu, X., & Tu, Y. (2018). *Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives*. 2018.

Zhou H., C. Q. and L. G. (2014). Interface Engineering of Highly Efficient Perovskite Solar Cells. *Science*, 345 (6196), 542–546.  
<https://doi.org/10.1126/science.1254050>