

# Perkembangan *concentrated solar cells* (CSC) untuk meningkatkan efisiensi energi matahari menuju energi bersih dan berkelanjutan

Reggina Aulia Yusuf, Putri Indah Ayu Setianingsih, Ashilah Diandra Hernawan, Deviany, Fauzi Yusupandi, Ido Suryanto, Selvy Armada, Ega Amoret Yusadetama, Jihan Luthfi Corrysha, Dea Amanda Nugraha, Tiara Fitri Afriliza, Misbahudin Alhanif\*

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera  
Jl. Terusan Ryacudu, Way Hui, Jati Agung, Lampung Selatan, Indonesia  
\*misbahudin.alhanif@tk.itera.ac.id

## ABSTRAK

Dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, sel surya menjadi salah satu potensi energi terbarukan yang menjanjikan, terutama di wilayah dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi seperti di Indonesia. Berbagai jenis sel surya telah banyak dikembangkan, mulai dari generasi pertama hingga generasi ketiga sebagai era baru dalam perkembangan teknologi sel surya. *Concentrated Solar Cell* (CSC) memunculkan harapan baru dalam pemanfaatan energi surya. Konsep dasar CSC melibatkan penggunaan lensa atau cermin konsentrator untuk meningkatkan intensitas cahaya matahari yang mencapai sel surya. Dengan memanfaatkan efek fotovoltaiik pada material semikonduktor, CSC dapat meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik. Mekanisme kerja CSC tidak hanya mengurangi jumlah sel yang diperlukan, tetapi juga memungkinkan desain *multi-junction tandem* yang lebih efisien, menggunakan bahan dan proses produksi yang umumnya mahal namun menjadi lebih terjangkau melalui penggunaan CSC. Berdasarkan ulasan analisis siklus hidup (LCA) yang dilakukan beberapa peneliti, CSC menunjukkan keunggulan dalam pengurangan material terbatas, seperti germanium (Ge) dan gallium (Ga), yang mendukung keberlanjutan pada skala besar. Keunggulan ini memberikan gambaran lebih luas tentang dampak positif CSC terhadap penurunan ketergantungan pada sumber daya yang langka dan peningkatan keberlanjutan di sektor energi.

**Kata kunci:** *concentrated solar cell*, energi terbarukan, *life cycle analysis*

## ABSTRACT

*In an effort to reduce dependence on fossil energy, solar cells are becoming one of the promising renewable energy potential, especially in areas with high sunlight intensity like Indonesia. Various types of solar cells have been extensively developed, ranging from the first to the third generation as a new era in the development of solar cell technology. Concentrated Solar Cell (CSC) brings new hope in the use of solar energy. The basic concept of CSC involves the use of lenses or concentrator mirrors to increase the intensity of sunlight reaching the solar cell. By leveraging the photovoltaic effect on semiconductor materials, CSC can improve the efficiency of converting solar energy to electricity. The working mechanism of the CSC not only reduces the number of cells required, but also allows for more efficient multi-junction tandem design, using materials and production processes that are generally expensive but become more affordable through the use of CSC. Based on a review of life cycle analysis (LCA) conducted by several researchers, CSCs show an advantage in reducing limited materials, such as germanium (Ge) and gallium (Ga), which support sustainability on a large scale. This advantage provides a broader picture of the positive impact of CSC on reduced dependence on scarce resources and increased sustainability in the energy sector.*

**Keywords:** *concentrated solar cell*, renewable energy, *life cycle analysis*

## 1. PENDAHULUAN

Energi menjadi sektor strategis dan berperan penting untuk mencapai tujuan ekonomi, sosial, maupun lingkungan dalam rangka pembangunan berkelanjutan. Kebutuhan energi Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan meningkatnya pertumbuhan jumlah penduduk [1].

Dengan peningkatan kebutuhan energi tersebut menjadikan tantangan bagi Indonesia untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Menurut Renstra Kementerian ESDM di Sektor Migas tahun 2021, rata-rata peningkatan pemanfaatan gas dalam kurun waktu 2015-2019 sebesar 9,2% [2]. Selain itu, produksi BBM dalam negeri yang berada pada kisaran 59% dari total kebutuhan, menjadikan Indonesia harus melakukan impor untuk memenuhi kekurangannya [2].

Disisi lain, Indonesia memiliki potensi berbagai sumber energi terbarukan yang sangat besar. Konferensi pembangunan berkelanjutan sistem energi, air, dan lingkungan (*Sustainable Development of Energy, Water, and Environmental Systems/SDEWES*) Tahun 2022 membahas beberapa kajian sumber daya energi baru dan terbarukan (EBT) dalam rangka upaya mendukung tercapainya *Net Zero Emission Carbon 2060* [3]. Salah satu pemanfaatan potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) yang dibahas adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau juga biasa dikenal sebagai *solar panel* yang memiliki komponen utama berupa sel surya. Berdasarkan data Portal Informasi Indonesia [4], di antara berbagai potensi EBT yang ada, sel surya memiliki potensi besar hingga 3.294 MW. Akan tetapi, pemanfaatan sel surya di Indonesia tercatat masih sangat rendah, hanya sekitar 0,01%.

Matahari sebagai sumber energi yang digunakan oleh sel surya mengirimkan sejumlah besar energi dalam bentuk panas dan radiasi. Tingkat kepadatan energi matahari di atmosfer mencapai  $1360 \text{ W/m}^2$ , dan di permukaan bumi sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$  [5]. Energi ini merupakan sumber energi tak terbatas yang tersedia tanpa biaya, terlebih wilayah Indonesia yang dilintasi garis *khatulistiwa* memiliki intensitas energi surya yang sangat melimpah. Konsep pemanenan energi surya dapat diklasifikasikan menjadi konversi aktif dan pasif. Teknologi konversi pasif merupakan pemanenan energi surya tanpa mengubah energi panas atau cahaya, sedangkan konversi aktif diartikan sebagai konversi radiasi matahari menjadi bentuk energi lain [6]. Teknologi konversi aktif memerlukan mesin dan peralatan listrik (misalnya pompa dan kipas) untuk mengubah energi surya menjadi panas dan listrik. Teknologi konversi aktif dapat dikelompokkan menjadi teknologi fotovoltaik (PV) dan sel surya terkonsentrasi (CSC).

Saat ini, efisiensi teknologi CSC dan PV yang tersedia berkisar antara 12 - 30% [7]–[9]. Pada CSC, energi surya dikonsentrasikan dalam kolektor untuk memanaskan fluida kerja menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan dialirkan ke turbin untuk menghasilkan listrik. Di CSC, cermin/reflektor dengan peningkatan tinggi digunakan untuk memusatkan energi surya. Empat jenis teknologi CSC yang tersedia saat ini diantaranya palung parabola (*parabolic troughs*), cermin Fresnel (*Fresnel mirrors*), menara Listrik (*power tower*), dan piringan pengumpul energi surya (*solar dish collectors*) [10]. Sudut datang matahari, kehilangan energi (*loss*), dan kekotoran (*soiling*) adalah tiga komponen utama yang mempengaruhi kepadatan energi yang dihasilkan oleh CSC [11].

Sejauh pengetahuan penulis, beberapa ulasan telah tersedia dalam berbagai literatur mengenai teknologi energi surya. Misalnya, Parida dan Iniyan [12] dan Shubbak [13] yang mengulas teknologi PV surya, Fernandez dkk. [14] dan Islam dkk. [15] mengulas teknologi CSC arus utama, dan Shahabuddin dkk. [16] mengulas perkembangan dan tantangan CSC. Namun, literatur yang menganalisis secara keseluruhan teknologi CSC yang dikaitkan dengan analisis siklus hidup (*life cycle assessment/LCA*), aplikasi dan perkembangannya masih terbatas. Selain gambaran singkat tentang sel surya, tinjauan ini juga mengkaji teknologi inti CSC, mekanisme kerja, efisiensi dan analisis siklus hidup. Lebih lanjut, aplikasi dan perkembangan terbaru CSC, tantangan teknologi CSC, dan prospek masa depan diuraikan di bagian selanjutnya dari tinjauan ini. Tinjauan ini akan membantu para peneliti menetapkan jalur untuk penelitian di masa depan berdasarkan perkembangan terkini dan tantangan teknologi CSC.

## 2. METODE PENELITIAN

Langkah pertama dalam metode pengulasan ini adalah menetapkan tujuan yang jelas dan ruang lingkup yang spesifik. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji perkembangan terkini dalam teknologi CSC dan bagaimana teknologi tersebut dapat meningkatkan efisiensi energi matahari. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada literatur yang diterbitkan dalam 10 tahun terakhir, yang berfokus pada inovasi teknologi CSC, efisiensi energi, dan kontribusi terhadap energi bersih dan berkelanjutan. Penelusuran literatur dilakukan menggunakan database ilmiah terkemuka seperti *Google Scholar*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, dan *Web of Science*. Kata kunci yang digunakan meliputi "*Concentrated Solar Cells*", "*CSC efficiency*", "*solar energy*", "*clean energy*", dan "*sustainable energy*". Artikel yang tidak memenuhi kriteria ini akan dikecualikan dari ulasan. Proses

seleksi dimulai dengan membaca judul dan abstrak artikel untuk menentukan relevansinya. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi akan dipilih untuk evaluasi lebih lanjut. Evaluasi mendalam dilakukan dengan membaca artikel secara penuh dan melakukan analisis kritis terhadap metodologi, hasil, dan kesimpulan yang disajikan. Aspek-aspek penting yang dicatat meliputi jenis teknologi CSC yang dibahas, metodologi penelitian, peningkatan efisiensi yang dilaporkan, serta aplikasi dan dampak terhadap energi bersih dan berkelanjutan. Informasi yang diperoleh dari literatur akan dikategorikan berdasarkan tema-tema utama seperti jenis teknologi CSC, peningkatan efisiensi, aplikasi praktis, dan dampak lingkungan. Analisis perbandingan dilakukan untuk mengidentifikasi tren umum, kemajuan, dan tantangan dalam teknologi CSC. Proses sintesis ini bertujuan untuk menyusun gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi CSC dan implikasinya.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Sel Surya

Sel surya, atau *solar cell*, adalah perangkat elektronik yang mampu mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui pemanfaatan efek fotovoltaiik. Efek fotovoltaiik ini merupakan fenomena di mana material semikonduktor menghasilkan arus listrik saat terkena cahaya matahari [16]. Teknologi sel surya telah menjadi inovasi penting dalam upaya global untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional, seperti bahan bakar fosil, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

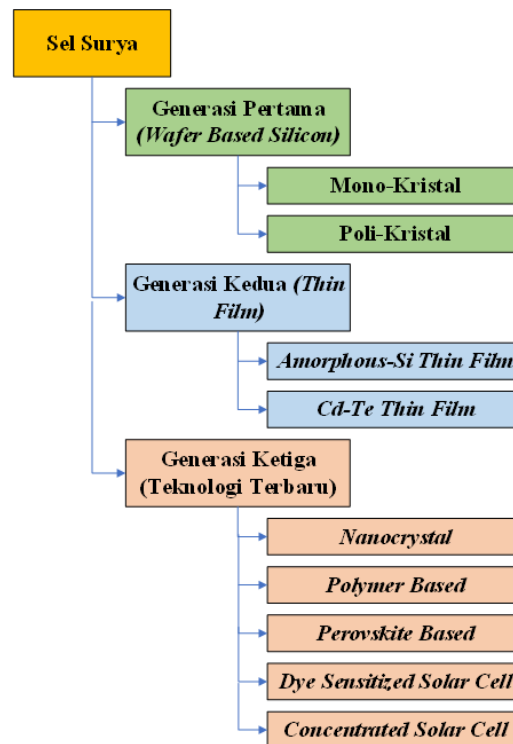
Efek fotovoltaiik pertama kali diamati oleh Alexandre-Edmond Becquerel pada tahun 1839 [17]. Kemudian, pada tahun 1946, sel surya modern pertama yang terbuat dari silikon ditemukan oleh Russel Ohl [17]. Sel surya fotovoltaiik awal berupa wafer silikon tipis yang mengubah energi sinar matahari menjadi daya listrik. Teknologi fotovoltaiik modern didasarkan pada prinsip penciptaan pasangan elektron-hole di setiap sel yang terdiri dari dua lapisan berbeda (material tipe-p dan tipe-n) dari bahan semikonduktor. Dalam struktur ini, ketika sebuah foton dengan energi yang cukup menabrak pertemuan antara lapisan tipe-p dan tipe-n, sebuah elektron akan terlepas dengan mendapatkan energi dari foton tersebut dan bergerak dari satu lapisan ke lapisan lainnya. Proses ini menciptakan elektron dan *hole* yang kemudian menghasilkan daya listrik [18].

Berbagai jenis material yang digunakan untuk sel surya fotovoltaiik terutama meliputi silikon (silikon kristal tunggal, multi-kristal, dan silikon amorf) [19], kadmium-tellurida, tembaga-indium-galium-selenida, dan tembaga-indium-galium-sulfida [18].

Penggunaan sel surya telah berkembang pesat dan meluas dalam berbagai aplikasi. Di sektor perumahan dan komersial, panel surya digunakan untuk menyediakan energi listrik yang bersih dan terbarukan, membantu mengurangi biaya listrik dan emisi karbon. Selain itu, pembangkit listrik tenaga surya skala besar menjadi semakin umum, berkontribusi signifikan dalam penyediaan energi pada jaringan listrik nasional di berbagai negara. Sel surya juga diaplikasikan dalam perangkat elektronik portabel, seperti kalkulator dan lampu taman, yang memanfaatkan energi matahari untuk operasional harian mereka.

#### 3.2 Jenis-Jenis Sel Surya

Eksplorasi inovasi terhadap solusi energi terbarukan melalui pemanfaatan energi surya terus dilakukan. Saat ini, terdapat beberapa jenis teknologi sel surya yang sudah matang ataupun masih dalam pengembangan. Pada Gambar 1 telah disajikan jenis-jenis sel surya berdasarkan generasinya. Generasi pertama merupakan sel surya yang paling dominan digunakan saat ini. Generasi kedua merupakan penyempurnaan dan inovasi yang lebih modern dari generasi pertama, sedangkan generasi ketiga merupakan teknologi baru dan belum secara luas dikomersialkan.



Gambar 1. Jenis-jenis sel surya [20]

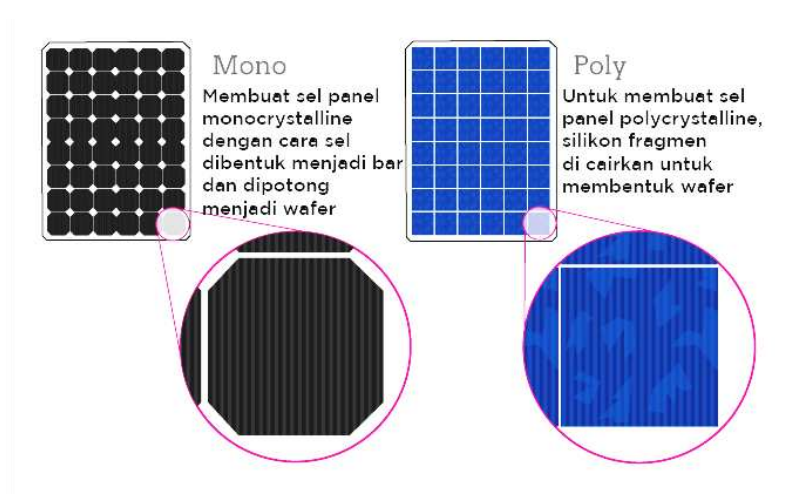
a) Generasi Pertama

Sel surya generasi pertama ini berbasis wafer kristal silikon. Silikon (Si) sebagai material semikonduktor pada sel surya dibuat berlapis seperti pada permukaan wafer, ditampilkan Gambar 2. Saat ini sel surya generasi pertama masih mendominasi pasar komersial panel surya. Keunggulan utama dari sel surya generasi pertama ini adalah teknologinya yang paling matang dan efisiensi cukup tinggi. Namun kekurangannya adalah material dan proses manufaktur yang cukup mahal serta adanya kehilangan energi foton [21].



Gambar 2. *Silicon wafer based solar cell*

Struktur sel surya tipe wafer silikon dapat diklasifikasikan menjadi monokristalin dan polikristalin. Sel surya silikon monokristalin (mono-Si) dibuat dari kristal silikon melalui proses Czochralski dengan ketebalan sekitar 160-190  $\mu\text{m}$ . Silikon ini kemudian digunakan untuk aplikasi sel surya dalam bentuk silinder dengan diameter tipikal 8 inci ( $\sim 200$  mm). Permukaan silinder dari ingot besar kemudian dipotong untuk membentuk persegi. Ingot ini dapat disiapkan sebagai silikon intrinsik, silikon tipe-p yang didoping, atau jenis silikon lainnya. Doping tipe-p biasanya dicapai dengan menggunakan boron, sedangkan doping tipe-n dicapai dengan menggunakan fosfor. Kristal silikon dipotong dari ingot besar. Pengembangan kristal tunggal membutuhkan penanganan yang akurat karena fase rekristalisasi sel cukup mahal dan kompleks. Sel-sel ini memiliki efisiensi sekitar 20% [22]. Dari segi tampilan, sel monokristalin berbentuk kotak berwarna gelap seragam dengan tepi membulat, berbeda dengan sel surya silikon polikristalin, seperti ditampilkan Gambar 3.

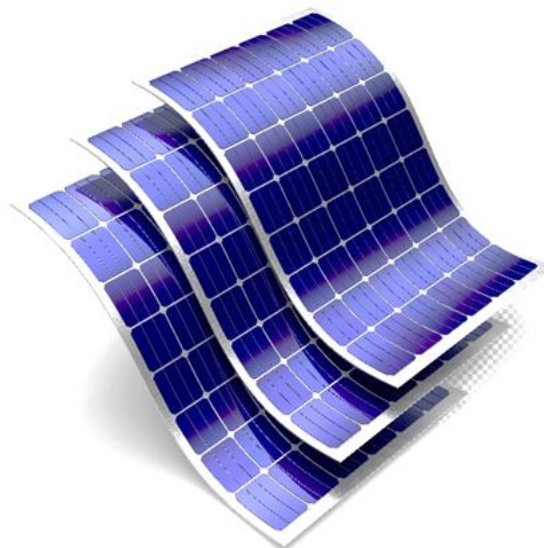


**Gambar 3. Perbedaan sel surya mono dan polikristalin [23]**

Sementara itu sel surya silikon polikristalin umumnya terdiri dari sejumlah kristal yang berbeda, dikelompokkan bersama dalam satu sel selama proses pembuatan. Manufaktur sel silikon polikristalin lebih ekonomis yaitu melalui pendinginan cetakan grafit yang berisi silikon cair. Selama pepadatan silikon cair, berbagai struktur kristal terbentuk. Meskipun biaya manufaktur sel surya polikristalin ini sedikit lebih murah dibanding jenis monokristalin, sel surya jenis ini kurang efisien 12-14% dibanding jenis monokristalin. Meskipun begitu, sel surya polikristalin merupakan yang paling populer hingga saat ini [24]. Dari segi tampilannya, sel surya polikristalin berwarna biru dengan bentuk kotak tanpa tepi membulat [23].

#### b) Generasi Kedua

Sel surya film tipis (*thin film*) seperti ditampilkan Gambar 4 merupakan sel surya generasi kedua, yang lebih ekonomis dibanding generasi pertama. Sel surya film tipis memiliki lapisan penyerapan cahaya yang sangat tipis dibandingkan sel wafer silicon. Lapisan wafer silicon setebal  $350\mu\text{m}$  sedangkan sel surya film tipis hanya sebesar  $1\mu\text{m}$ . Sel surya yang terdiri dari dua lapisan memiliki struktur lapisan tipis mikrokristal silikon dan amorphous dengan efisiensi modul hingga 8,5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt daya yang dihasilkan lebih besar daripada monokristal & polikristalin [25].

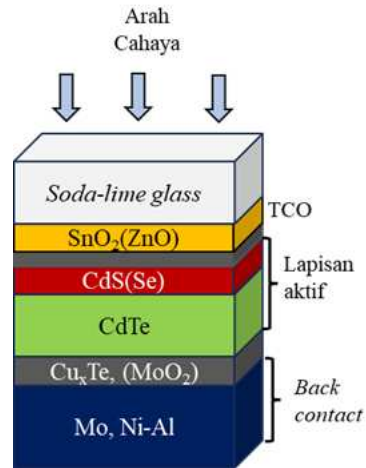


**Gambar 4. Sel surya generasi kedua (film tipis)**

Sel surya silikon amorf (a-Si) merupakan jenis sel surya generasi kedua yang pertama kali diproduksi secara industri. Sel surya tipe ini dapat diproduksi pada suhu pemrosesan yang rendah, sehingga memungkinkan penggunaan berbagai substrat berbiaya rendah, polimer, ataupun material fleksibel lainnya. Melalui uji di laboratorium, sel surya silikon amorf memiliki efisiensi 2 hingga 3

persen untuk sambungan tunggal (*single junction*). Inovasi terus dilakukan hingga efisiensi naik hingga 13% untuk sel surya dengan *multiple structure* (*multijunction solar cell*) [26].

Inovasi terbaru adalah *thin film triple junction photovoltaic* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang setara. Proses manufaktur ini secara signifikan mengurangi biaya produksi dan memungkinkan skalabilitas cepat hingga volume tinggi.



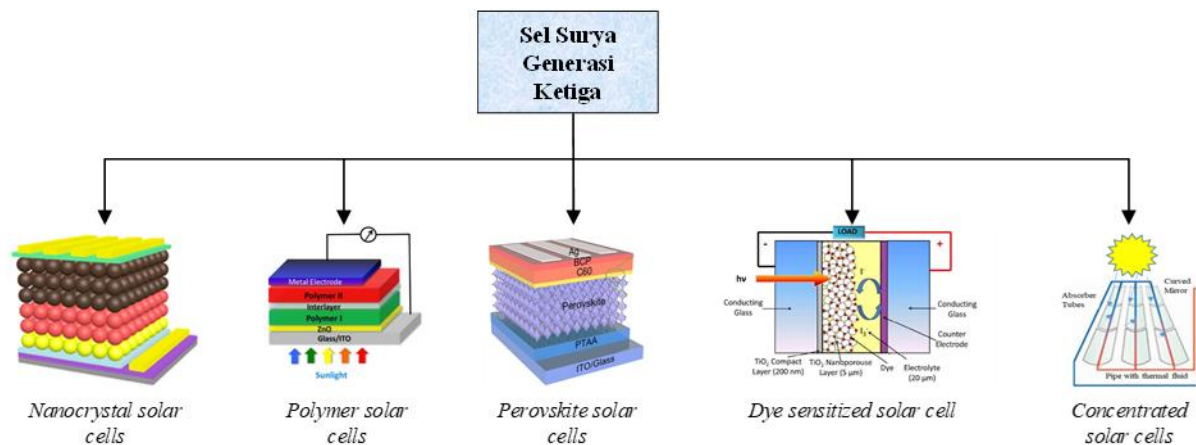
Gambar 5. Struktur sel surya kadmium telurida [27]

Sel surya kadmium tellurida (Cd-Te) adalah jenis sel surya film tipis yang kedua, ditampilkan Gambar 5. Dari aspek serapan optik, sel surya tipe ini memiliki koefisien serapan optik yang tinggi dan stabilitas kimia yang baik. Sifat dari unsur kadmium (Cd) dan tellurium (Te) menjadikannya bahan paling menarik untuk desain sel surya film tipis karena merupakan material semikonduktor kristal dengan celah pita yang mempermudah penyerapan cahaya dan meningkatkan efisiensi. Dioda sambungan pn biasanya dibuat dengan mengapit lapisan kadmium sulfida di antara keduanya [27].

Sel surya CdTe memiliki efisiensi rata-rata sebesar 19%, namun uji laboratorium yang dilakukan oleh First Solar telah mencapai rekor efisiensi sebesar 22,1%. Efisiensi ini lebih rendah 1-6% dibanding sel surya modul kristal, namun dari segi ekonomis 70% lebih rendah. Selain itu sel surya film tipis CdTe juga lebih mudah beradaptasi dengan struktur berbeda (fleksibel) sehingga banyak digunakan untuk instalasi pembangkit listrik tenaga surya maupun dipasang di pesawat luar angkasa. Meskipun material yang digunakan pada sel surya jenis CdTe terbilang murah, namun terdapat masalah toksisitas dan juga masalah kesehatan yang melekat pada material tersebut. Bahkan Greenpeace telah memperingatkan tentang tingkat toksisitas dan kontaminasi bahan-bahan ini, dengan menyatakan bahwa sel surya CdTe mengandung  $6\text{g/m}^2$  logam beracun dan menghasilkan emisi kadmium yang setara dengan  $0,5\text{g/GWh}$  [28].

### c) Generasi Ketiga

Sel surya generasi ketiga merupakan teknologi terbaru yang cukup menarik dan menjanjikan, namun belum diteliti secara komersial. Sel surya generasi ini di antaranya : *nano-crystal based solar cell*, *polymer based solar cell*, *dye sensitized solar cell* (DCCS) dan *concentrated solar cell* (CSC), seperti diilustrasikan Gambar 6. Kelebihan dari sel surya generasi ini adalah biaya produksi yang rendah dan efisiensi yang dapat bersaing dengan sel surya generasi pertama. Namun hal yang masih menjadi tantangan untuk sel surya generasi ketiga adalah stabilitas jangka pendek dan teknologi yang belum matang (*immature technology*) [29].



Gambar 6. Sel surya generasi ketiga [29]

Di antara sel surya generasi ketiga ini, *concentrated solar cell* (CSC) memiliki efisiensi tertinggi karena penggunaan material yang efisien serta pelacak matahari yang menjadikannya pilihan menarik dalam upaya mengoptimalkan potensi surya untuk kebutuhan masa depan. Selain itu, CSC dapat diintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi (*thermal energy storage*) sehingga dapat menghasilkan listrik walaupun matahari sedang tidak bersinar [30].

### 3.3 Concentrated Solar Cell (CSC) Dalam Upaya Peningkatan Efisiensi Energi

Sel surya terkonsentrasi atau *CSC* merupakan bentuk teknologi surya yang berfokus pada peningkatan efisiensi melalui konsentrasi intensitas cahaya matahari ke sel surya. Pada prinsipnya, sel ini mengumpulkan sejumlah besar energi matahari dengan menggunakan lensa atau cermin cembung kecil dengan tujuan meningkatkan intensitas cahaya yang masuk ke sel [31]. Mengumpulkan cahaya menggunakan cermin atau lensa, dalam sejarahnya dikaitkan pada pembentukan panas. Terdapat catatan Romawi yang menyatakan bahwa Archimedes pertama menemukan konsep ini untuk menyerang kapal-kapal Romawi dengan membakarnya menggunakan pantulan cahaya dari cermin. Lalu dalam perkembangannya, para peneliti dan insinyur menggunakan panas dari matahari melalui konsentrator untuk mengoperasikan mesin uap dan pompa air kemudian menghasilkan listrik melalui mesin yang berputar. Hingga saat ini upaya peningkatan efisiensi dengan pemilihan material dan inovasi desain terus dikembangkan [32].

### 3.4 Mekanisme Kerja CSC

Sistem lensa (kolektor) pada *CSC* mampu memfokuskan energi radiasi cahaya matahari pada suatu penerima (receiver), sehingga dapat meningkatkan kuantitas energi yang diserap oleh absorber. Energi yang diperoleh selanjutnya digerakkan oleh mesin yang dikendalikan oleh pembangkit listrik yang terintegrasi [33].

Pada *CSC*, sinar matahari dipantulkan dan difokuskan pada penerima (*receiver*), dengan pantulan inframerah diarahkan ke pipa cahaya serat optik untuk diangkut ke sel elektrolisis oksida padat bersuhu tinggi. Listrik hasil dari tenaga surya dikirim ke sel elektrolisis yang sama yang menggunakan panas dan listrik untuk memisahkan air. Pemisah spektral pada titik fokus memantulkan radiasi matahari inframerah dan mentransmisikan sinar tampak (*visible light*) matahari ke sel surya efisiensi tinggi di belakang *spectral splitter* [32].

Berbeda dengan sistem fotovoltaik/sel surya plat datar yang biasa digunakan di atap rumah atau bangunan, konsentrator surya pada *CSC* dapat melacak matahari untuk memfokuskan cahaya ke dalamnya. Pelacakan matahari ini dapat meningkatkan produksi energi harian yang melebihi sel surya datar yang tidak dilengkapi dengan pelacak (*non-tracking flat plate*) [32], [34].

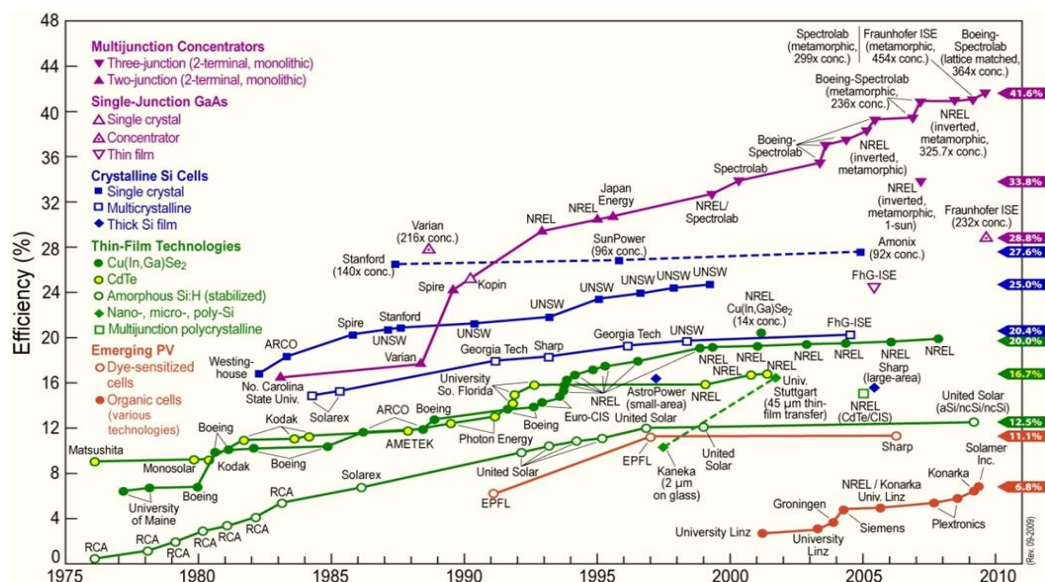
Berdasarkan basis per area, sel *photovoltaic* (PV) merupakan komponen yang paling mahal dari sistem tenaga surya. Pada *CSC*, konsentrator menggunakan bahan yang relatif ekonomis seperti lensa plastik dengan wadah logam untuk menyerap energi matahari yang menyinari area sel, lalu memfokuskan energi tersebut ke area yang lebih kecil pada sel surya. Hal ini menjadi salah satu keunggulan *CSC* dibanding sistem sel surya plat datar. Selain itu, dengan adanya konsentrator dapat mengurangi jumlah kebutuhan bahan terutama material dengan ketersediaan terbatas, seperti

Germanium (Ge) dan Gallium (Ga) sehingga memungkinkan keberlanjutan dalam skenario jangka panjang [32]–[34].

### 3.5 Efisiensi Penggunaan CSC

Sistem CSC menjadi pembangkit listrik berbiaya relatif rendah karena substitusi sel surya yang mahal dengan kaca atau lensa penahan baja struktural yang lebih murah. Namun di samping itu, sistem ini juga menunjukkan pentingnya efisiensi optik, karena kehilangan optik terkadang dapat menurunkan efisiensi sistem hingga 15-20% [32]. Hingga saat ini (2023), efisiensi CSC berkisar antara 20-40%. Nilai tersebut sebanding, bahkan lebih tinggi dibandingkan sistem pembangkit listrik tenaga surya lainnya yang memiliki efisiensi berkisar 18-26%. Nilai efisiensi konversi energi surya dari pembangkit listrik CSC juga dapat bersaing secara baik dengan pembangkit listrik tenaga batubara atau nuklir, yang efisiensi energinya sekitar 35%, meskipun masih lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik siklus gabungan (*combined cycle power plant*) dari penggunaan gas alam (45-50%) [35].

Efisiensi CSC yang relatif tinggi di antara teknologi sel surya ini dikaitkan dengan pengurangan ukuran atau jumlah sel yang dibutuhkan pada sistem. Hal ini memungkinkan desain tandem multi-jungsi (*multi-junction tandem*) sehingga tidak memerlukan proses dan bahan material yang lebih mahal [36].



Gambar 7. Efisiensi berbagai jenis sel surya [32]

Penelitian mengenai sel surya multijungsi telah dimulai pada tahun 1980-an sebagai bagian dari upaya Departemen Energi Amerika Serikat untuk mengeksplorasi material sel surya dan proses baru yang lebih efisien. Sel surya sambungan tunggal dipasang hanya pada satu panjang gelombang spektrum matahari, sehingga efisiensi maksimumnya hanya dapat dicapai pada spektrum tersebut. Berdasarkan temuan, jumlah sambungan yang tidak terbatas akan menjadi cara paling efektif untuk 'memanen atau menangkap' setiap warna dalam spektrum gelombang matahari. Secara teori, rangkaian sambungan tersebut dapat mengkonversi lebih dari 80% sinar matahari menjadi energi listrik [32], [36].

Namun di lain sisi, sel surya dengan dua buah sambungan monolitik pertama, yang dibuat hampir 3 dekade setelah penemuan sel surya modern menunjukkan efisiensi yang lebih kecil dibandingkan sel sambungan tunggal. Masalah terbesarnya adalah kesulitan dalam membuat interkoneksi dioda antar sambungan sehingga menghambat keberhasilan sel surya ini. Teknologi sel surya multi sambungan ini didasarkan pada unsur-unsur dalam kolom III dan V tabel periodik; oleh karena itu, sel surya ini sering disebut sebagai sel surya III-V [32], [36]. Gambar 7 merangkum perkembangan hasil penelitian efisiensi berbagai tipe sel surya dalam kurun waktu kurang lebih 3 dekade hingga 2010.

### 3.6 Analisis Siklus Hidup CSC

Analisis siklus hidup (*life cycle assessment, LCA*) menjadi alat untuk mengukur seberapa efisien bahan dan energi masuk dan keluar, serta limbah yang dihasilkan dari seluruh siklus hidup pada sebuah proses [37], [38]. Fthenakis [32] telah melakukan LCA untuk Amonix 7700 CSC berbasis biaya material, bahan bakar, dan penggunaan listrik. LCA dimulai dari perolehan bahan material, meliputi produksi, pembuatan komponen, pengangkutan, perakitan, dan pemasangan, serta pengoperasian dan pemeliharaan, kemudian diakhiri dengan pembuangannya.

Berdasarkan hasil LCA, komposisi yang mendominasi penggunaan material Amonix 7700 adalah baja (75%), beton (11%), dan aluminium (11%). Jumlah kebutuhan energi kumulatif seluruh bagian sistem juga dihitung, yang kemudian dibandingkan dengan energi yang dihasilkan sistem. Hasil penelitian membuktikan produksi energi sistem 7700 CSC di Las Vegas selama setahun, dengan memperhitungkan potensi kerugian kinerja lapangan sebagai berikut: pengotor tambahan (2%), rugi-rugi pada kabel AC dan trafo (2%), ketersediaan (1%), penyimpangan sudut oleh angin (0,5%), dan kerugian dari batas sudut elevasi (0,8%). Analisis mereka menghasilkan 144.000 kWh/tahun pembangkitan listrik untuk Las Vegas [32].

Emisi gas rumah kaca (GRK) selama tahapan LCA sistem Amonix 7700 CSC disetarakan dengan emisi CO<sub>2</sub>. Setelah normalisasi listrik yang dihasilkan, sistem ini akan menghasilkan 26-27 g CO<sub>2</sub>-eq./kWh selama 30 tahun pengoperasiannya. Memperpanjang umur sistem hingga 50 tahun dengan perawatan yang baik, dan mengganti sel surya dan lensa Fresnel setiap 25 tahun sekali, akan menurunkan emisi siklus hidupnya menjadi sekitar 16 g CO<sub>2</sub>-eq./kWh. Dari ulasan LCA ini dapat disimpulkan, Amonix 7700, sel surya bertipe CSC memiliki keunggulan signifikan, terutama dibanding sel surya silikon kristalin datar (*fixed crystalline silicon solar-cell*) [32].

Selain itu, terdapat pula analisis siklus hidup LCA yang dilakukan oleh Gasa, dkk. [37] menyajikan perbandingan penilaian siklus hidup dua pembangkit menara CSC, salah satunya tanpa penyimpanan (*thermal storage*) dan dijadikan referensi, dan yang lainnya dengan penyimpanan. Dari penelitian tersebut disimpulkan: (1) CSC tanpa penyimpanan memiliki dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan pabrik dengan penyimpanan. Ketika total dampak per kWh listrik yang dihasilkan bersih dievaluasi menggunakan indikator ReCiPe, pembangkit listrik menara CSC tanpa penyimpanan menghasilkan dampak 46% lebih besar. (2) Ketika indikator perubahan iklim per kWh produksi bersih listrik diperhitungkan, dampaknya 67% lebih tinggi tanpa penyimpanan (31 gCO<sub>2</sub> eq/kWh) dibandingkan dengan penyimpanan (9,8 gCO<sub>2</sub> eq/kWh). Komponen medan surya yang menghasilkan dampak tertinggi, baik untuk pembangkit listrik tanpa penyimpanan maupun untuk pembangkit dengan penyimpanan, adalah struktur logam heliostat yang diikuti dengan pondasi beton [37]. Dari simpulan tersebut artinya CSC lebih baik menggunakan *thermal storage* meskipun akan menambah biaya produksi, namun biaya tersebut dapat mengkompensasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari CSC.

Berdasarkan dua ulasan LCA tersebut, emisi GRK yang dihasilkan dari CSC dapat dikatakan sangat rendah jika dibandingkan emisi dari pembangkit listrik dan sumber emisi GRK lainnya secara global, yang dirangkum pada Tabel 1. Artinya, pengembangan aplikasi CSC saat ini dapat menjadi solusi menjanjikan demi tercapainya transisi energi bersih di 2060. Di lain sisi, sebuah penelitian menerbitkan studi tentang kelayakan sistem fotovoltaik berskala sangat besar di barat daya Amerika Serikat, dan pembangkit listrik yang tersebar di seluruh negeri. Energi listrik berasal dari bauran energi terbarukan yang sebagian besar terdiri dari *photovoltaic* dan CSC pada akhir abad ini, dapat memasok 100% dari kebutuhan listrik sepanjang tahun. Sementara surplus listrik selama musim panas dapat menghasilkan 260 miliar kg hidrogen melalui elektrolisis dengan listrik yang bersumber dari CSC. Dengan menambahkan 5,2 TW pada sel surya yang didedikasikan untuk produksi hidrogen, sebanyak 5666 juta kendaraan, truk, kapal, dan pesawat terbang dapat berbahan bakar hidrogen [32], [38].

**Tabel 1. Perbandingan emisi gas rumah kaca dari berbagai sumber emisi**

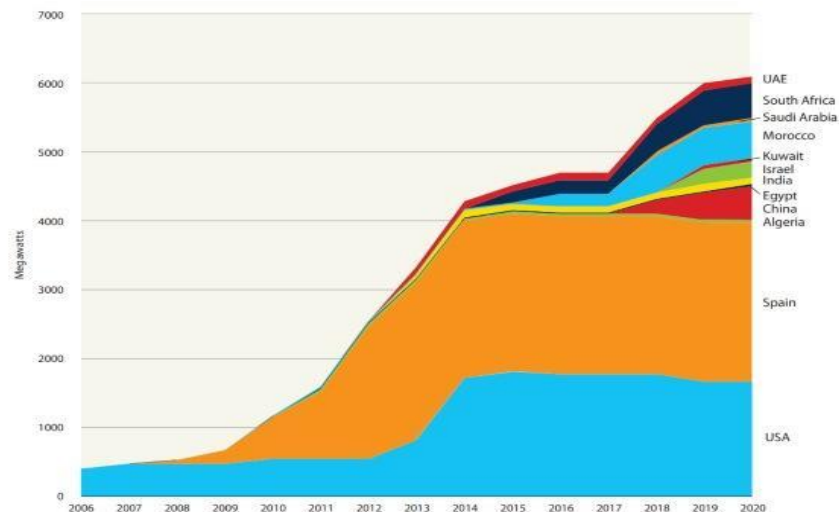
No.	Sumber Emisi GRK Secara Global	Nilai Emisi Gas CO <sub>2</sub> eq	Kontribusi Terhadap Total Emisi GRK Nasional
1.	Bahan bakar fosil	0,27 Gt	21,38%
2.	Pembangkit Listrik Tenaga Uap	0,25 Gt	20,44%
3.	Pertanian	0,19 Gt	15,24%
4.	Pembakaran energi untuk industri	0,18 Gt	14,68%
5.	Transportasi	0,15 Gt	11,74%
6.	Limbah	0,10 Gt	7,72 %
7.	Proses industri	0,07 Gt	5,48%
8.	Pembakaran energi untuk bangunan non-industri	0,04 Gt	3,06%
9.	Pembangkit listrik jenis CSC	26-31 g	0,26%

### 3.7 Aplikasi dan Perkembangan Terbaru CSC

Inovasi dan perkembangan CSC terus dilakukan di era modern ini, di antaranya :

- 1) Pemenuhan kebutuhan listrik untuk pemanasan air laut pada proses desalinasi. *Plant* desalinasi akan menggunakan CSC untuk memanaskan kubah baja yang dapat 'merebus' air laut. Saat ini Arab Saudi mempunyai *plant* desalinasi air laut yang telah selesai dibangun pada akhir 2022. Biaya pembangunan *desalination plant* tersebut dilaporkan sekitar \$0.34 per meter kubik [39].
- 2) *Solar dryer*, metode pengeringan pada industri yang biasanya menggunakan bahan bakar fosil. Dengan pengaplikasian CSC, teknologi ini memberikan efisiensi pengeringan yang lebih baik jika digabung dengan *thermal energy storage* untuk memperpanjang operasi kerja sehingga dapat mengurangi biaya produksi [40]. Sebuah penelitian di tahun 2017 mempelajari parabola berbasis udara melalui kolektor surya (CSC) untuk proses pengeringan buah [41]. Berdasarkan penelitian tersebut, pengering surya berbasis CSC dapat menghilangkan lebih banyak uap air per jam dibandingkan pengering surya non-konsentrat [41].
- 3) *Solar water heater* yang biasa digunakan untuk memanaskan air, baik untuk keperluan industri atau rumahannya khususnya di daerah empat musim dengan dilengkapi *thermal storage* bawah tanah. Konsumsi energi listrik dan gas dalam memanaskan air dapat digantikan dengan solar water heater [42].
- 4) Produksi hidrogen hijau dari elektrolisis yang bersumber dari energi surya berbasis CSC [32], [43]. Pengembangan sistem CSC untuk hidrogen hijau tengah dikembangkan École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) di Swiss. Melalui eksperimen, perangkat CSC mampu menghasilkan hidrogen hijau dengan laju lebih dari 2 kilowatt sambil mempertahankan efisiensi di atas 20%. Pada perangkat skala percontohan yang sudah beroperasi di bawah kondisi sinar matahari, juga menghasilkan panas dan oksigen yang dapat digunakan. Dikatakan bahwa perangkat tersebut akan dikomersilkan dalam waktu dekat [43].
- 5) *Concentrating solar power plant* yang menggunakan cermin untuk memusatkan energi matahari sehingga dapat menggerakkan mesin pembangkit listrik. Saat ini, Dubai telah memulai pembangunan ambisius pembangkit listrik tenaga surya terkonsentrasi (CSC) terbesar di dunia yang beroperasi pada kuartal tahun 2020 [44].

Hingga saat ini telah ada beberapa negara di dunia yang menerapkan sistem CSC untuk pembangkit listrik, seperti ditampilkan Gambar 8. Pasar global terus menunjukkan pertumbuhan penggunaan CSC di tahun 2022, dengan pemasangan pembangkit listrik baru berkapasitas 750 mW di China dan Uni Emirat Arab. Spanyol sebagai negara dengan instalasi CSC terbanyak di dunia dengan total hampir 50 pembangkit listrik yang berkapasitas hingga 2.300 MW merupakan pemimpin global dalam teknologi ini. Pada tahun 2021, pembangkitan CSC mencapai 4.719 GWh atau mewakili 1,84 persen dari total kebutuhan listrik pada tahun tersebut. Amerika Serikat yang menempati peringkat kedua negara dengan instalasi CSC terbesar di dunia memiliki kapasitas 1,8 GW yang telah dilengkapi *thermal energy storage* sehingga dapat beroperasi lebih dari 6 jam [35].



Gambar 8. Kapasitas kumulatif sistem CSC yang terinstal di seluruh dunia [35]

### 3.8 Tantangan dan Masa Depan CSC

Hingga saat ini, CSC masih belum mampu bersaing secara komersial dengan energi fotovoltaik atau *solar panel* konvensional di tingkat global. Terdapat beberapa keterbatasan yang menjadi tantangan signifikan bagi CSC berbasis CSC untuk dapat bersaing secara global, di antaranya [45]:

- 1) Biaya pembangunan awal (*initial cost*) plant CSC relatif masih lebih tinggi dikarenakan kompleksitas teknologinya
- 2) Bergantung pada intensitas cahaya matahari untuk mengoptimalkan performanya, sehingga tidak dapat menghasilkan daya listrik yang seragam di beberapa negara dengan intensitas matahari berbeda
- 3) Memerlukan lahan yang cukup luas

Agar CSC dapat bersaing, biaya listrik yang dihasilkan harus diturunkan. Berdasarkan hukum kedua termodinamika, efisiensi konversi energi panas meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Tren yang diamati dalam penelitian menunjukkan peningkatan teknologi menara penerima pusat (*central receiver tower*) untuk meningkatkan suhu konversi menjadi sekitar 700°C hingga 800°C. Namun, menggunakan uap pada suhu sedemikian tinggi sangatlah tidak praktis, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mencari pengganti uap. Salah satu solusinya adalah dengan menggunakan garam cair sebagai media penyimpan panas. Pada menara konsentrasi ini, campuran natrium nitrat dan kalium dipanaskan hingga mencapai 600°C hingga 800°C. Garam cair ini kemudian disimpan dalam endapan yang terisolasi secara termal di dalam tanah. Selanjutnya, listrik dihasilkan secara konvensional dengan cara garam cair mengalir melalui alat penukar panas yang menghasilkan uap, dan uap tersebut menggerakkan turbin tekanan tinggi untuk menghasilkan listrik [35].

Melihat prospek yang begitu besar dari sistem CSC ini, diprediksi pada tahun-tahun mendatang akan lebih banyak pembangkit listrik berbasis CSC di negara-negara dengan cuaca cerah, meskipun biayanya harus diturunkan secara signifikan untuk mengimbangi energi fotovoltaik [35].

## 4. KESIMPULAN

Dalam upaya menuju energi bersih dan berkelanjutan, teknologi CSC menjadi inovasi yang menjanjikan dalam pemanfaatan energi surya. Konsep dasar dari CSC melibatkan penggunaan lensa atau cermin konsentrator untuk meningkatkan intensitas cahaya matahari yang jatuh pada sel surya, dengan tujuan meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik. Mekanisme kerja CSC memungkinkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sel surya konvensional, mengurangi jumlah sel yang diperlukan, dan memungkinkan desain multi-junction tandem yang lebih efisien. Dalam analisis siklus hidup (*life cycle analysis*), CSC menunjukkan keunggulan dalam pengurangan material yang terbatas, seperti germanium (Ge) dan gallium (Ga), yang mendukung keberlanjutan pada skala besar. Meskipun demikian, tantangan tetap ada, termasuk biaya tinggi untuk optik konsentrasi, kompleksitas pelacakan matahari, dan perlunya mencapai keseimbangan biaya agar tambahan energi yang dihasilkan oleh sistem CSC dapat mengimbangi biaya komponen tambahan.

Dengan terus berlanjutnya penelitian dan pengembangan, CSC menjanjikan kontribusi yang substansial dalam transformasi menuju energi bersih dan berkelanjutan. Kemampuannya untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi ketergantungan pada sumber daya yang langka, dan memberikan kontribusi positif terhadap lingkungan, membuat teknologi ini menjadi pilihan menarik dalam diversifikasi sumber energi untuk masa depan yang lebih berkelanjutan. Masuknya sistem CSC ke pasar untuk produksi listrik saat ini, dengan peningkatan efisiensi sel surya mendekati 40% dan gagasan yang lebih jelas untuk mencapai efisiensi sel surya 50%, serta peluang untuk menggunakan panas matahari yang terbuang untuk menambah elektrolisis surya, menunjukkan potensi untuk dengan cepat menurunkan biaya hidrogen bersih.

## REFERENSI

- [1] H. Limanseto, "Transisi Energi Ciptakan Pembangunan Berkelanjutan yang Ramah Lingkungan," *Siaran Pers*, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.ekon.go.id/publikasi/detail/3353/transisi-energi-ciptakan-pembangunan-berkelanjutan-yang-ramah-lingkungan>
- [2] Kementerian ESDM, "Rencana Strategis Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Tahun 2020-2024." 2020.
- [3] P. A. Østergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, dan S. Kalogirou, "Renewable energy for sustainable development," *Renew. Energy*, vol. 199, hal. 1145–1152, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.065>.
- [4] F. Hidranto, "Potensi Raksasa Panel Surya," *Portal Informasi Indonesia*, 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/6913/potensi-raksasa-industri-panel-surya?lang=1>
- [5] S. C. Bhatia, *Advanced Renewable Energy Systems*. in Woodhead Publishing India in energy. Woodhead Publishing India PVT Limited, 2014. [Daring]. Tersedia pada: <https://books.google.co.id/books?id=yxgRngEACAAJ>
- [6] M. Herrando dan C. N. Markides, "Hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heat and power provision in the UK: Techno-economic considerations," *Appl. Energy*, vol. 161, hal. 512–532, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.025>.
- [7] K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, dan D. S. Apul, "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, hal. 133–141, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.057>.
- [8] M. J. (Mariska) de Wild-Scholten, "Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 119, hal. 296–305, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.08.037>.
- [9] P. Verlinden, "High-Efficiency Back-Contact Silicon Solar Cells for One-Sun and Concentrator Applications," *Sol. Cells*, hal. 327–351, Des 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-386964-7.00011-1.
- [10] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, dan K.-H. Kim, "Solar energy: Potential and future prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, hal. 894–900, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [11] M. Yousefzadeh dan M. Lenzen, "Performance of concentrating solar power plants in a whole-of-grid context," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, hal. 109342, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109342>.
- [12] B. Parida, S. Iniyana, dan R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, hal. 1625–1636, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>.
- [13] M. H. Shubbak, "Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 115, hal. 109383, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>.
- [14] A. G. Fernández, J. Gomez-Vidal, E. Oró, A. Kruiženga, A. Solé, dan L. F. Cabeza, "Mainstreaming commercial CSP systems: A technology review," *Renew. Energy*, vol. 140, hal. 152–176, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.049>.
- [15] M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah, dan R. Saidur, "A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, hal. 987–1018, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>.
- [16] M. Shahabuddin, M. A. Alim, T. Alam, M. Mofijur, S. F. Ahmed, dan G. Perkins, "A critical review on the development and challenges of concentrated solar power technologies," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 47, no. June, hal. 101434, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101434.
- [17] A. Yadav, A. Pawan Kumar, dan M. Tech, "Enhancement in Efficiency of Pv Cell Through P&O Algorithm," *Int. J. Technol. Res. Eng.*, vol. 2, no. 11, hal. 2347–4718, 2015, [Daring]. Tersedia pada: [www.ijtre.com](http://www.ijtre.com)
- [18] B. Srinivas, S. Balaji, N. B.M., dan Y. S. Reddy, "Review on Present and Advance Materials for Solar Cells," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 3, hal. 178–182, 2015.

- [19] A. McEvoy, L. Castaner, dan T. Markvart, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. Elsevier Science, 2012. [Daring]. Tersedia pada: <https://books.google.co.id/books?id=cGbBXzamDh4C>
- [20] S. Sharma, K. K. Jain, dan A. Sharma, "Solar Cells: In Research and Applications—A Review," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 06, no. 12, hal. 1145–1155, 2015, doi: 10.4236/msa.2015.612113.
- [21] H. D. Pham, T. C.-J. Yang, S. M. Jain, G. J. Wilson, dan P. Sonar, "Development of Dopant-Free Organic Hole Transporting Materials for Perovskite Solar Cells," *Adv. Energy Mater.*, vol. 10, no. 13, hal. 1903326, Apr 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201903326>.
- [22] DSNE, "Production of CZ (Czochralski) Monocrystalline Silicon Ingots and Solar Wafers," *DS New Energy*, 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://id.dnsolar.com/info/cz-czochralski-monocrystalline-silicon-solar-49796674.html>
- [23] American Solar Energy Society, "Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels," 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- [24] M. K. H. Rabaia, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, dan A. G. Olabi, "Chapter 2.2 - Developments of solar photovoltaics," in *Renewable Energy - Volume 1 : Solar, Wind, and Hydropower*, A. G. B. T.-R. E.-V. 1 : S. Olabi Wind, and Hydropower, Ed., Academic Press, 2023, hal. 175–195. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99568-9.00011-X>.
- [25] A. Valavanidis, "Renewable and Environmentally Sustainable Energy Sources. The Role of Chemistry and New Technological Developments," *Sci. Rep.*, no. March, hal. 1–57, 2016, [Daring]. Tersedia pada: [http://www.chem.uoa.gr/wp-content/uploads/epistimonika\\_themata/renewable-energy-chem-solutions.pdf](http://www.chem.uoa.gr/wp-content/uploads/epistimonika_themata/renewable-energy-chem-solutions.pdf)
- [26] S. Prayogi, A. Ayunis, Y. Cahyono, dan D. Darminto, "Fabrikasi dan Analisis Struktur Sel Surya Amorf Menggunakan Sistem PECVD," *JRST (Jurnal Ris. Sains dan Teknol.)*, vol. 7, no. 2, hal. 201, 2023, doi: 10.30595/jrst.v7i2.16874.
- [27] R. Jaiswal, A. Kumar, dan A. Yadav, "Chapter 23 - Nanomaterials based solar cells," in *Micro and Nano Technologies*, H. Song, T. A. Nguyen, G. Yasin, N. B. Singh, dan R. K. B. T.-N. in the A. I. Gupta, Ed., Elsevier, 2022, hal. 467–484. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00025-6>.
- [28] S. Kwok, "What Are Cadmium Telluride (CdTe) Solar Panels? How Do They Compare to Other Panels?" 2023. [Daring]. Tersedia pada: [https://solarbuy.com/solar-101/cdte-cadmium-telluride-solar-panels/#:~:text=and other aspects.,Amorphous silicon \(a-Si\) vs.,for thin-film solar panels.](https://solarbuy.com/solar-101/cdte-cadmium-telluride-solar-panels/#:~:text=and other aspects.,Amorphous silicon (a-Si) vs.,for thin-film solar panels.)
- [29] A. Mohamed dan Y. Selim, "Factors Affect Dye Sensitized Solar Cells performance," *Renew. Energy Sustain. Dev.*, vol. 3, no. 1, hal. 83–86, 2017, doi: 10.21622/resd.2017.03.1.083.
- [30] K. Thoubboron, "Concentrated solar power (csp): What you need to know?" 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.energysage.com/about-clean-energy/solar/contentrated-solar-power-overview/>
- [31] A. Pandey, P. Pandey, dan J. S. Tumuluru, "Solar Energy Production in India and Commonly Used," *Energies*, vol. 15, hal. 1–26, 2022.
- [32] Vasilis Fthenakis, "Third Generation Photovoltaics." IntechOpen, Rijeka, 2012. doi: 10.5772/1386.
- [33] K. Lovegrove dan J. Pye, "Chapter 2 - Fundamental principles of concentrating solar power systems," in *Woodhead Publishing Series in Energy*, K. Lovegrove dan W. B. T.-C. S. P. T. (Second E. Stein, Ed., Woodhead Publishing, 2021, hal. 19–71. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819970-1.00013-X>.
- [34] A. Nayfeh dan S. Abdul Hadi, "Chapter 3 - Basics of solar cells," in *Solar Cell Engineering*, A. Nayfeh dan S. B. T.-S.-G. A. for P. A. Abdul Hadi, Ed., Elsevier, 2023, hal. 17–35. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85630-0.00004-2>.
- [35] I. Mártil, "Pros and Cons of Concentrated Solar Power." 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/innovation/pros-and-cons-concentrated-solar-power/>
- [36] J. Marsh, "Multi-junction solar cells: What you need to know?" Energy Sage, 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.energysage.com/solar/solar-photovoltaic-cells/multijunction-solar-cells/>
- [37] G. Gasa, C. Prieto, A. Lopez-Roman, dan L. F. Cabeza, "Life cycle assessment (LCA) of a concentrating solar power (CSP) plant in tower configuration with different storage capacity in molten salts," *J. Energy Storage*, vol. 53, hal. 105219, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105219>.
- [38] A. Alrashidi, "Investigating the feasibility of solar photovoltaic systems in Kuwait Investigating the Feasibility of Solar Photovoltaic Systems in Kuwait," 2017.
- [39] NET, "Concentrated Solar Power Salt Water Desalination Plant." Solar Thermal Energy News Helioscp, 2022. [Daring]. Tersedia pada: <https://helioscsp.com/concentrated-solar-power-salt-water-desalination-plant/>
- [40] M. I. Hussain dan G. H. Lee, "Concentrated solar powered agricultural products dryer: Energy, exergoeconomic and exergo-environmental analyses," *J. Clean. Prod.*, vol. 393, hal. 136162, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136162>.
- [41] F. Ullah dan M. Kang, "Impact of air flow rate on drying of apples and performance assessment of parabolic trough solar collector," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, hal. 275–280, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.101>.
- [42] NREL, "Concentrated Solar Heat." NREL Transforming Energy, 2023. [Daring]. Tersedia pada:

- <https://www.nrel.gov/csp/concentrated-solar-heat.html>
- [43] I. Dumé, “Concentrated solar reactor generates unprecedented amounts of hydrogen.” 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://physicsworld.com/a/concentrated-solar-reactor-generates-unprecedented-amounts-of-hydrogen/>
- [44] Helioscp, “World’s Largest Concentrated Solar Power Plant is in Dubai.” 2019. [Daring]. Tersedia pada: <https://helioscsp.com/worlds-largest-concentrated-solar-power-plant/>
- [45] GM, “Advantages and Disadvantages of Solar Cells.” 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/06/advantages-and-disadvantages-of-solar-cells>.