

EPISTEMEUS

Open Scientific Essay

ANALISIS EFEK FOTOLISTRIK SEBAGAI DASAR KONVERSI ENERGI CAHAYA MENJADI ENERGI LISTRIK PADA TEKNOLOGI PANEL SURYA

Hosea Pratama Sinaga

ABSTRAK

Panel surya menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang paling dekat dengan kehidupan sehari-hari karena mampu mengubah cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Prinsip kerja teknologi tersebut tidak dapat dilepaskan dari konsep fisika modern, terutama efek fotolistrik dan efek fotovoltaiik pada bahan semikonduktor. Kajian ini membahas hubungan antara energi foton, celah energi, pembentukan pasangan elektron-hole, sambungan p-n, arus foto, tegangan keluaran, daya maksimum, dan efisiensi sel surya. Metode yang digunakan berupa studi literatur dengan analisis deskriptif-kuantitatif melalui penurunan konsep dan perhitungan sederhana. Pembahasan memperlihatkan bahwa energi foton mengikuti persamaan $E = hf$ atau $E = hc/\lambda$ sedangkan syarat dasar pembangkitan muatan pada semikonduktor dinyatakan sebagai $hf \geq E_g$. Pada silikon dengan celah energi sekitar 1,12 eV, cahaya dengan panjang gelombang lebih pendek dari sekitar 1100 nm berpeluang membangkitkan pembawa muatan. Sel surya kemudian memisahkan elektron dan hole melalui medan listrik internal pada sambungan p-n sehingga menghasilkan arus listrik. Kinerja panel surya dipengaruhi oleh intensitas cahaya, suhu, material, rekombinasi pembawa muatan, rugi optik, resistansi seri, resistansi shunt, dan nilai fill factor. Kajian ini menempatkan panel surya sebagai penerapan nyata fisika modern dalam teknologi energi, bukan sekadar perangkat listrik biasa, melainkan sistem kuantum-semikonduktor yang bekerja melalui interaksi cahaya dan materi pada skala mikroskopis [1].

Kata Kunci: efek fotolistrik, efek fotovoltaiik, foton, sel surya, semikonduktor, energi listrik

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan penggunaan perangkat elektronik dalam kegiatan harian. Di banyak negara, sebagian besar listrik masih berasal dari sumber energi fosil yang menghasilkan emisi karbon dioksida dan gas rumah kaca lain. Kondisi tersebut mendorong pencarian sumber energi yang lebih bersih, tersedia luas, dan dapat dimanfaatkan dalam jangka panjang. Energi surya berada pada posisi menarik karena matahari menyediakan radiasi elektromagnetik dalam jumlah besar, tersebar, dan dapat dikonversi menjadi listrik tanpa proses pembakaran bahan bakar [2].

Panel surya memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber energi primer. Perangkat ini tidak memiliki bagian bergerak seperti turbin, tidak membutuhkan uap bertekanan tinggi, dan tidak memerlukan proses mekanik besar untuk menghasilkan listrik. Konversi terjadi langsung pada tingkat material ketika cahaya diserap oleh semikonduktor. Keunikan tersebut membuat panel surya berbeda dari pembangkit listrik konvensional karena proses intinya berada pada interaksi antara foton dan elektron, bukan pada pembakaran atau putaran generator [3].

Kajian tentang panel surya tidak cukup dibahas dari sisi kelistrikan luar seperti arus, tegangan, dan daya keluaran. Bagian paling mendasar justru berada pada peristiwa mikroskopis saat cahaya mengenai material. Cahaya membawa energi dalam bentuk foton, sedangkan elektron di dalam bahan semikonduktor menempati pita energi tertentu. Jika energi foton cukup besar, elektron dapat berpindah ke tingkat energi yang memungkinkan terbentuknya arus listrik. Pemahaman ini membuat panel surya menjadi contoh langsung penerapan konsep kuantum dalam teknologi modern [4].

Efek fotolistrik memiliki posisi historis yang kuat dalam perkembangan fisika modern. Gejala keluarnya elektron dari permukaan material akibat penyinaran cahaya semula sulit dijelaskan oleh teori gelombang klasik. Frekuensi cahaya lebih menentukan energi elektron dibandingkan intensitas cahaya. Penjelasan tersebut membuka jalan bagi gagasan bahwa energi cahaya tidak tersebar kontinu, tetapi hadir dalam paket-paket diskrit. Dari sini lahir fondasi penting bagi mekanika kuantum dan teknologi berbasis interaksi cahaya-materi [5].

Dalam panel surya, istilah yang lebih tepat untuk proses kerja perangkat adalah efek fotovoltaiik. Efek ini masih berkerabat dengan efek fotolistrik karena sama-sama melibatkan penyerapan foton oleh elektron. Bedanya, elektron pada sel surya tidak harus keluar dari permukaan material menuju ruang bebas. Elektron cukup berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, lalu dipisahkan dari hole oleh medan listrik internal pada sambungan p-n. Pemisahan muatan tersebut membuat beda potensial muncul dan arus dapat mengalir melalui rangkaian luar [6].

Tujuan kajian ini adalah menjelaskan secara runtut konsep efek fotolistrik sebagai dasar pemahaman kerja panel surya, menganalisis syarat energi foton terhadap celah energi semikonduktor, menjelaskan pembentukan arus dan tegangan pada sel surya, serta menghubungkan parameter fisika tersebut dengan efisiensi konversi energi. Pembahasan dibuat sebagai kajian ilmiah berbasis literatur dan perhitungan teoretis, sehingga isi paper tidak bergantung pada eksperimen laboratorium pribadi, melainkan pada konsep yang telah mapan dalam fisika modern dan fisika semikonduktor [7].

2. Teori

a. Cahaya sebagai foton

Dalam fisika klasik, cahaya sering dijelaskan sebagai gelombang elektromagnetik yang merambat dengan kecepatan $c = 3,00 \times 10^8$ m/s di ruang hampa. Pandangan ini berhasil menerangkan interferensi, difraksi, polarisasi, dan pemantulan. Saat masuk ke wilayah radiasi benda hitam dan efek fotolistrik, pendekatan gelombang klasik menemui batas. Energi radiasi perlu dipahami dalam bentuk kuantum agar spektrum yang teramati sesuai dengan hasil eksperimen [8].

Gagasan kuantisasi energi menyatakan bahwa energi cahaya bergantung pada frekuensi. Hubungan tersebut ditulis sebagai

$$E = hf$$

dengan E sebagai energi foton, h sebagai konstanta Planck $6,626 \times 10^{-34}$ J s, dan f sebagai frekuensi cahaya. Persamaan ini memberi arti bahwa satu foton cahaya berfrekuensi tinggi membawa energi lebih besar daripada satu foton cahaya berfrekuensi rendah. Intensitas cahaya berkaitan dengan jumlah foton yang datang, bukan energi tiap foton [9].

Frekuensi cahaya berkaitan dengan panjang gelombang melalui persamaan

$$c = f\lambda$$

dengan c sebagai cepat rambat cahaya dan λ sebagai panjang gelombang. Jika persamaan tersebut digabungkan dengan $E = hf$, energi foton dapat ditulis menjadi

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Bentuk ini sering lebih praktis saat membahas panel surya karena spektrum matahari biasanya dinyatakan berdasarkan panjang gelombang. Cahaya berpanjang gelombang pendek seperti ultraviolet membawa energi lebih besar, sedangkan cahaya inframerah membawa energi lebih kecil [10].

Dalam satuan elektronvolt, hubungan energi foton dengan panjang gelombang sering ditulis secara ringkas sebagai

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

Sebagai contoh, cahaya dengan panjang gelombang 550 nm memiliki energi sekitar

$$E = \frac{1240}{550} \approx 2,25 \text{ eV}$$

Energi sebesar ini cukup besar untuk membangkitkan elektron pada beberapa bahan semikonduktor, termasuk silikon, selama energi tersebut melebihi celah energi bahan [11].

b. Efek Fotolistrik Eksternal

Efek fotolistrik eksternal terjadi ketika elektron terlepas dari permukaan material akibat penyinaran cahaya. Pada logam, elektron terikat oleh energi tertentu yang disebut fungsi kerja. Jika energi foton lebih kecil dari fungsi kerja, elektron tidak keluar dari permukaan. Jika energi foton lebih besar dari fungsi kerja, sisa energi berubah menjadi energi kinetik elektron yang lepas [12].

Persamaan utama efek fotolistrik ditulis sebagai

$$K_{\text{maks}} = hf - \phi$$

dengan K_{maks} sebagai energi kinetik maksimum elektron, hf sebagai energi foton, dan ϕ sebagai fungsi kerja material. Frekuensi ambang diperoleh saat energi kinetik maksimum bernilai nol, sehingga

$$hf_0 = \phi$$

atau

$$f_0 = \frac{\phi}{h}$$

Cahaya dengan frekuensi di bawah f_0 tidak mampu melepaskan elektron meskipun intensitasnya dibuat besar [13].

Tegangan penghenti dalam eksperimen fotolistrik berhubungan dengan energi kinetik maksimum elektron melalui persamaan

$$eV_s = K_{\text{maks}}$$

sehingga

$$eV_s = hf - \phi$$

dengan e sebagai muatan elektron dan V_s sebagai tegangan penghenti. Persamaan tersebut memberi cara untuk menguji hubungan linier antara frekuensi cahaya dan energi elektron. Kemiringan grafik eV_s terhadap f menghasilkan konstanta Planck, sedangkan titik potongnya berkaitan dengan fungsi kerja material [14].

Efek fotolistrik memperlihatkan perbedaan mendasar antara intensitas dan frekuensi. Intensitas besar berarti jumlah foton lebih banyak, sehingga jumlah elektron yang terlepas bisa meningkat. Frekuensi menentukan energi tiap foton, sehingga menentukan apakah elektron dapat lepas dan seberapa besar energi kinetiknya. Dalam bahasa sederhana, banyaknya cahaya dan tajamnya energi cahaya bukan hal yang sama [15].

c. Efek Fotovoltaik pada Semikonduktor

Sel surya bekerja melalui efek fotovoltaik, yaitu terbentuknya tegangan dan arus listrik akibat penyerapan cahaya pada bahan semikonduktor. Proses ini masih berada dalam keluarga besar efek fotolistrik karena foton memberi energi kepada elektron. Perbedaannya terletak pada lokasi muatan. Pada efek fotolistrik eksternal, elektron keluar dari material. Pada efek fotovoltaik, elektron tetap berada di dalam material dan bergerak melalui rangkaian listrik [16].

Semikonduktor memiliki struktur pita energi yang terdiri dari pita valensi dan pita konduksi. Elektron pada pita valensi masih terikat dalam ikatan atom, sedangkan elektron pada pita konduksi lebih bebas bergerak sebagai pembawa muatan. Jarak energi antara kedua pita disebut celah energi atau band gap, dilambangkan E_g . Foton hanya efektif membangkitkan pasangan elektron-hole jika energinya memenuhi

$$hf \geq E_g$$

Jika syarat ini tidak terpenuhi, foton cenderung lewat atau berubah menjadi pengaruh termal yang tidak menghasilkan arus listrik berarti [17].

Pada silikon kristalin, celah energi berada di sekitar

$$E_g \approx 1,12 \text{ eV}$$

pada suhu ruang. Batas panjang gelombang foton yang masih dapat diserap untuk membangkitkan elektron dapat dihitung dengan

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g}$$

Dalam bentuk praktis,

$$\lambda_g(\text{nm}) = \frac{1240}{E_g(\text{eV})}$$

Untuk silikon,

$$\lambda_g = \frac{1240}{1,12} \approx 1107 \text{ nm}$$

Cahaya dengan panjang gelombang lebih pendek dari nilai tersebut membawa energi yang cukup untuk membangkitkan pasangan elektron-hole [18].

Foton dengan energi jauh lebih besar dari E_g memang dapat membangkitkan elektron, tetapi kelebihan energinya tidak seluruhnya berubah menjadi listrik. Sebagian energi berlebih cepat hilang sebagai panas melalui proses termalisasi. Di sisi lain, foton dengan energi lebih kecil dari E_g tidak memberi kontribusi besar pada pembangkitan pembawa muatan. Dua mekanisme ini menjadi sumber rugi-rugi fundamental dalam sel surya [19].

d. Sambungan p-n sebagai Pemisah Muatan

Sel surya silikon umumnya menggunakan sambungan p-n. Daerah tipe-p memiliki konsentrasi hole lebih tinggi karena diberi dopan akseptor, sedangkan daerah tipe-n memiliki konsentrasi elektron lebih tinggi karena diberi dopan donor. Saat kedua daerah bersentuhan, elektron dan hole berdifusi lalu membentuk daerah deplesi. Di daerah ini muncul medan listrik internal yang berperan memisahkan muatan hasil penyerapan foton [20].

Potensial bawaan pada sambungan p-n dapat ditulis sebagai

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

dengan V_{bi} sebagai potensial bawaan, k sebagai konstanta Boltzmann, T sebagai suhu mutlak, q sebagai muatan elektron, N_A sebagai konsentrasi akseptor, N_D sebagai konsentrasi donor, dan n_i sebagai konsentrasi pembawa intrinsik. Persamaan ini menghubungkan sifat material, suhu, dan tingkat doping terhadap medan internal yang diperlukan dalam kerja sel surya [21].

Ketika cahaya diserap dekat daerah deplesi, elektron terdorong ke sisi tipe-n dan hole terdorong ke sisi tipe-p. Pemisahan ini mengurangi peluang rekombinasi langsung antara elektron dan hole. Jika rangkaian luar dihubungkan, elektron mengalir melewati beban listrik dari sisi n menuju sisi p. Arus yang mengalir pada rangkaian luar inilah yang dimanfaatkan sebagai energi listrik [22].

Tanpa sambungan p-n atau mekanisme pemisah muatan lain, pasangan elektron-hole yang terbentuk akibat cahaya akan mudah berekombinasi. Rekombinasi berarti elektron kembali mengisi hole, lalu energi yang semula diperoleh dari foton hilang sebagai panas atau radiasi. Desain sel surya selalu berusaha memperbesar peluang pembawa muatan terkumpul di elektroda sebelum rekombinasi terjadi [23].

e. Model Listrik Sel Surya

Secara listrik, sel surya dapat dimodelkan sebagai sumber arus foto yang dipasang sejajar dengan dioda. Model sederhana arus-tegangan ditulis sebagai

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$$

dengan I sebagai arus keluaran, I_{ph} sebagai arus foto, I_0 sebagai arus saturasi gelap, V sebagai tegangan, n sebagai faktor idealitas dioda, k sebagai konstanta Boltzmann, dan T sebagai suhu. Arus foto bergerak berlawanan arah dengan arus dioda, sehingga kurva $I - V$ sel surya berbeda dari dioda biasa [24].

Model yang lebih realistis memasukkan resistansi seri dan resistansi shunt. Persamaannya menjadi

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

dengan R_s sebagai resistansi seri dan R_{sh} sebagai resistansi shunt. Resistansi seri yang besar menurunkan tegangan efektif pada beban, sedangkan resistansi shunt yang kecil membuat arus bocor meningkat. Keduanya menurunkan daya maksimum dan efisiensi panel surya [25].

Pada kondisi hubung singkat, tegangan keluaran sama dengan nol. Arus yang mengalir disebut arus hubung singkat dan dilambangkan I_{sc} . Dalam pendekatan ideal,

$$I_{sc} \approx I_{ph}$$

Arus ini sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya, luas permukaan sel, spektrum radiasi, dan kemampuan material menyerap foton. Semakin banyak foton yang berhasil menghasilkan pasangan elektron-hole dan terkumpul di kontak listrik, semakin besar nilai I_{sc} . [26]

Pada kondisi rangkaian terbuka, arus keluaran sama dengan nol. Tegangan yang muncul disebut tegangan rangkaian terbuka atau V_{oc} . Persamaannya dapat ditulis sebagai

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$$

Nilai V_{oc} naik saat arus foto meningkat, tetapi turun saat arus saturasi gelap meningkat. Suhu tinggi biasanya membuat I_0 naik, sehingga tegangan keluaran panel surya cenderung turun ketika panel terlalu panas [27].

Daya listrik yang dihasilkan sel surya merupakan hasil kali arus dan tegangan

$$P = VI$$

Pada kurva $I - V$, titik daya maksimum berada saat P mencapai nilai terbesar. Tegangan dan arus pada titik tersebut dilambangkan V_m dan I_m , sehingga

$$P_{max} = V_m I_m$$

Titik ini menjadi target operasi panel surya karena energi listrik paling besar diperoleh bukan pada V_{oc} , bukan juga pada I_{sc} , melainkan pada kombinasi tegangan dan arus tertentu [28].

Fill factor menyatakan seberapa mendekati bentuk kurva $I - V$ sel surya terhadap bentuk ideal. Rumusnya

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

Nilai fill factor makin besar saat rugi resistansi kecil dan kualitas dioda baik. Pada sel surya yang buruk, kurva $I - V$ tampak lebih melengkung sehingga luas persegi daya maksimum mengecil. Fill factor menjadi parameter penting karena dua panel dengan V_{oc} dan I_{sc} mirip tetap bisa memiliki daya maksimum berbeda [29].

Efisiensi panel surya menyatakan perbandingan antara daya listrik maksimum dan daya cahaya yang masuk. Rumus umumnya

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

Jika daya masuk berasal dari irradiansi G pada luas permukaan A , maka

$$P_{\text{in}} = GA$$

sehingga

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{GA} \times 100\%$$

Persamaan ini menghubungkan kinerja listrik panel dengan kondisi penyinaran dan ukuran permukaan panel [30].

3. Metode Kajian

Kajian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif-kuantitatif. Sumber yang dipakai mencakup buku fisika modern, buku fisika semikonduktor, buku teknologi fotovoltaik, artikel historis tentang efek fotolistrik, serta literatur mengenai parameter kinerja sel surya. Pembahasan diarahkan untuk menjelaskan hubungan konsep, bukan untuk menguji panel surya secara langsung di laboratorium [31].

Data yang dianalisis berupa persamaan dasar dan nilai parameter yang umum digunakan dalam kajian sel surya. Nilai celah energi silikon digunakan sebagai contoh karena silikon merupakan material paling banyak dibahas dalam teknologi fotovoltaik. Perhitungan dilakukan untuk energi foton, batas panjang gelombang serapan, daya keluaran, fill factor, dan efisiensi. Angka yang dipakai bersifat ilustratif agar hubungan antarkonsep terlihat jelas [32].

Tahapan kajian dimulai dengan menjelaskan cahaya sebagai foton, kemudian membahas efek fotolistrik eksternal sebagai dasar historis. Setelah itu, pembahasan bergeser ke efek fotovoltaik pada semikonduktor, sambungan p-n, model rangkaian ekuivalen, dan parameter performa panel. Urutan ini dipakai agar pembaca melihat jembatan konsep dari fisika modern menuju teknologi energi [33].

Analisis matematis dilakukan dengan menurunkan beberapa rumus inti. Rumus $E = hf$ dan $E = hc/\lambda$ digunakan untuk menghubungkan cahaya dengan energi foton. Rumus $hf \geq E_g$ dipakai untuk menentukan syarat pembangkitan pembawa muatan. Model dioda digunakan untuk membaca hubungan arus dan tegangan, sedangkan rumus efisiensi digunakan untuk menilai besar energi cahaya yang berhasil dikonversi menjadi listrik [34].

Keterbatasan kajian terletak pada tidak adanya pengukuran langsung terhadap panel surya tertentu. Nilai arus, tegangan, fill factor, dan efisiensi yang muncul dalam contoh perhitungan bukan hasil eksperimen lapangan. Angka tersebut hanya dipakai sebagai simulasi sederhana supaya konsep lebih mudah dibaca. Kajian berbasis literatur tetap berguna karena prinsip fisika kerja panel surya dapat dijelaskan tanpa harus bergantung pada merek atau tipe panel tertentu [35].

4. Hasil

a. Hubungan Energi Foton dengan Spektrum Cahaya Matahari

Cahaya matahari yang sampai ke permukaan bumi terdiri dari rentang panjang gelombang ultraviolet, tampak, dan inframerah. Tidak semua bagian spektrum tersebut menghasilkan kontribusi listrik yang sama pada panel surya. Foton ultraviolet memiliki energi tinggi, cahaya tampak berada pada rentang energi menengah, sedangkan inframerah memiliki energi lebih rendah. Sel surya akan bekerja efektif saat energi foton sesuai dengan celah energi material penyerap [36].

Energi foton dapat dihitung dari panjang gelombangnya. Untuk cahaya merah dengan panjang gelombang 700 nm,

$$E = \frac{1240}{700} \approx 1,77 \text{ eV}$$

Untuk cahaya hijau 550 nm,

$$E = \frac{1240}{550} \approx 2,25 \text{ eV}$$

Untuk cahaya biru 450 nm,

$$E = \frac{1240}{450} \approx 2,76 \text{ eV}$$

Ketiga nilai tersebut lebih besar dari celah energi silikon sekitar 1,12 eV, sehingga secara energi mampu membangkitkan pasangan elektron-hole pada sel surya silikon [37].

Cahaya inframerah dekat dengan panjang gelombang 1200 nm memiliki energi

$$E = \frac{1240}{1200} \approx 1,03 \text{ eV}$$

Nilai ini lebih kecil dari celah energi silikon. Foton seperti ini tidak cukup kuat untuk menaikkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada silikon kristalin. Akibatnya, sebagian radiasi inframerah tidak ikut dikonversi menjadi listrik. Rugi transmisi seperti ini menjadi salah satu alasan efisiensi panel surya silikon tidak pernah mencapai 100 persen [38].

Cahaya ultraviolet dengan energi jauh lebih tinggi dari E_g juga tidak sepenuhnya menguntungkan. Misalnya panjang gelombang 350 nm memiliki energi

$$E = \frac{1240}{350} \approx 3,54 \text{ eV}$$

Setelah elektron naik ke pita konduksi, energi berlebih di atas celah energi cepat berubah menjadi panas. Untuk silikon, energi yang berguna secara ideal hanya sekitar 1,12 eV per pasangan elektron-hole, sedangkan sisanya masuk sebagai rugi termalisasi [39].

Hubungan antara energi foton dan celah energi dapat diringkas melalui tabel berikut.

Panjang gelombang	Energi foton	Terhadap silikon $E_g \approx 1,12 \text{ eV}$	Dampak utama
350 nm	3,54 eV	Lebih besar dari E_g	Menimbulkan pembawa muatan, energi berlebih menjadi panas
450 nm	2,76 eV	Lebih besar dari E_g	Efektif membangkitkan elektron-hole
550 nm	2,25 eV	Lebih besar dari E_g	Efektif pada spektrum tampak
700 nm	1,77 eV	Lebih besar dari E_g	Masih dapat diserap
1200 nm	1,03 eV	Lebih kecil dari E_g	Tidak cukup untuk membangkitkan pembawa muatan

Tabel tersebut menggambarkan bahwa panel surya membutuhkan kecocokan antara spektrum cahaya dan sifat material. Material dengan celah energi terlalu besar kehilangan banyak cahaya merah dan inframerah, sedangkan material dengan celah energi terlalu kecil kehilangan banyak energi melalui termalisasi. Pemilihan material menjadi persoalan kompromi antara jumlah foton yang diserap dan energi listrik yang dapat dipertahankan dari tiap foton [40].

b. Perbedaan Efek Fotolistrik dan Efek Fotovoltaik

Efek fotolistrik eksternal dan efek fotovoltaik sering dianggap sama secara sederhana karena keduanya melibatkan cahaya dan elektron. Keduanya memang memiliki akar konsep yang sama, yaitu penyerapan foton oleh elektron. Perbedaan penting muncul pada hasil akhirnya. Pada efek fotolistrik eksternal, elektron keluar dari material. Pada efek fotovoltaik, elektron tetap berada di dalam semikonduktor lalu diarahkan menjadi arus listrik [41].

Dalam efek fotolistrik eksternal, parameter kunci adalah fungsi kerja ϕ . Elektron baru dapat keluar dari permukaan jika

$$hf > \phi$$

Pada efek fotovoltaik, parameter kuncinya adalah celah energi E_g , sehingga syarat utamanya

$$hf \geq E_g$$

Kedua bentuk syarat ini mirip karena sama-sama membandingkan energi foton dengan energi ambang material. Fungsi kerja berkaitan dengan pelepasan elektron dari permukaan, sedangkan celah energi berkaitan dengan perpindahan elektron antar pita energi [42].

Panel surya tidak membutuhkan elektron untuk keluar ke udara. Elektron justru harus tetap berada di dalam jalur semikonduktor agar dapat dikumpulkan oleh kontak logam dan mengalir melalui rangkaian luar. Jika elektron keluar tanpa terkendali, perangkat tidak bekerja sebagai sumber listrik yang stabil. Karena alasan itu, pembahasan panel surya lebih tepat memakai istilah fotovoltaik, meski efek fotolistrik tetap menjadi dasar konseptual yang menjelaskan peran foton [43].

Secara praktis, efek fotolistrik membantu menjelaskan mengapa frekuensi atau panjang gelombang cahaya menjadi penentu. Intensitas cahaya yang tinggi menambah jumlah foton, sehingga arus dapat meningkat. Energi tiap foton tetap ditentukan oleh frekuensi. Jika foton tidak memiliki energi cukup untuk melewati ambang material, penambahan intensitas hanya memperbanyak foton yang tetap tidak efektif membangkitkan pembawa muatan [44].

c. Pembentukan Pasangan Elektron-Hole

Ketika foton diserap oleh semikonduktor, energi foton diberikan kepada elektron. Jika energi tersebut cukup, elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Kekosongan yang ditinggalkan elektron disebut hole. Hole dapat dipahami sebagai pembawa muatan positif karena kekosongan tersebut dapat berpindah melalui gerak elektron lain di pita valensi [45].

Laju pembangkitan pembawa muatan di dalam bahan dipengaruhi oleh koefisien serapan. Secara sederhana, intensitas cahaya yang masuk ke kedalaman x dapat ditulis sebagai

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

dengan I_0 sebagai intensitas awal dan α sebagai koefisien serapan. Nilai α besar berarti cahaya cepat diserap dekat permukaan. Nilai α kecil berarti cahaya menembus lebih dalam sebelum diserap [46].

Laju generasi pembawa muatan dapat ditulis secara konseptual sebagai

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda) \Phi_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x}$$

G sebagai laju generasi, Φ_0 sebagai fluks foton awal, dan λ sebagai panjang gelombang. Persamaan ini memperlihatkan bahwa lokasi pembentukan elektron-hole bergantung pada panjang gelombang cahaya dan sifat optik material. Desain ketebalan sel surya perlu memperhitungkan seberapa jauh cahaya menembus bahan [47].

Pasangan elektron-hole yang terbentuk belum tentu menjadi arus listrik. Jika pasangan tersebut berekombinasi sebelum mencapai daerah pemisahan muatan atau kontak listrik, energi foton gagal menjadi energi listrik. Rekombinasi dapat terjadi melalui cacat kristal, permukaan yang tidak terpasivasi, atau proses intrinsik dalam semikonduktor. Pengurangan rekombinasi menjadi salah satu target utama peningkatan efisiensi sel surya [48].

d. Peran Sambungan p-n dalam Menghasilkan Arus

Sambungan p-n bertindak seperti mesin pemilah muatan pada panel surya. Daerah deplesi memiliki medan listrik internal yang mengarahkan elektron ke sisi n dan hole ke sisi p. Tanpa medan ini, pasangan pembawa muatan lebih mudah hilang melalui rekombinasi. Dengan adanya medan internal, muatan yang terbentuk dari foton dapat dipisahkan sebelum saling meniadakan [49].

Arah arus konvensional berlawanan dengan arah gerak elektron. Dalam rangkaian luar, elektron bergerak dari kontak tipe-n melewati beban menuju kontak tipe-p. Dari sudut pandang arus konvensional, arus mengalir dari sisi p menuju sisi n melalui beban. Perbedaan bahasa ini sering membuat pembahasan arus sel surya tampak membingungkan, padahal keduanya menggambarkan proses yang sama dari sudut pandang tanda muatan berbeda [50].

Besar arus foto berhubungan dengan jumlah foton yang diserap dan jumlah pembawa muatan yang berhasil dikumpulkan. Secara umum, rapat arus hubung singkat dapat ditulis sebagai

$$J_{sc} = q \int \Phi(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda$$

J_{sc} sebagai rapat arus hubung singkat, $\Phi(\lambda)$ sebagai fluks foton spektral, dan $EQE(\lambda)$ sebagai external quantum efficiency. Nilai EQE menyatakan peluang foton pada panjang gelombang tertentu menghasilkan elektron yang terkumpul di rangkaian luar [51].

Jika rendah pada daerah panjang gelombang tertentu, berarti banyak foton pada daerah itu tidak berubah menjadi arus. Penyebabnya bisa berupa pantulan permukaan, penyerapan parasitik pada lapisan yang tidak aktif, rekombinasi pembawa muatan, atau panjang difusi pembawa yang terlalu pendek. Analisis EQE sering dipakai untuk membaca bagian spektrum mana yang belum dimanfaatkan secara optimal oleh sel surya [52].

e. Analisis Arus, Tegangan, dan Daya

Kurva $I - V$ sel surya menggambarkan hubungan antara arus keluaran dan tegangan pada berbagai kondisi beban. Saat beban sangat kecil, tegangan mendekati nol dan arus mendekati I_{sc} . Saat beban sangat besar, arus mendekati nol dan tegangan mendekati V_{oc} . Daya nol pada kedua ujung ekstrem tersebut karena $P = VI$. Daya terbesar muncul di titik tengah tertentu pada kurva [53].

Misalkan sebuah sel surya memiliki

$$V_{oc} = 0,65 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 9,0 \text{ A}$$

$$FF = 0,78$$

Daya maksimum dapat dihitung dengan

$$P_{\max} = V_{oc} I_{sc} FF$$

$$P_{\max} = 0,65 \times 9,0 \times 0,78$$

$$P_{\max} \approx 4,56 \text{ W}$$

Perhitungan ini memperlihatkan bahwa daya maksimum tidak cukup dihitung dari $V_{oc} I_{sc}$ karena bentuk kurva nyata selalu dikoreksi oleh fill factor [54].

Jika luas sel adalah $0,025 \text{ m}^2$ dan irradiansi matahari standar $G = 1000 \text{ W/m}^2$, daya cahaya yang masuk adalah

$$P_{in} = GA$$

$$P_{in} = 1000 \times 0,025 = 25 \text{ W}$$

Efisiensinya

$$\eta = \frac{4,56}{25} \times 100\% \approx 18,24\%$$

Nilai ini realistis sebagai contoh sederhana untuk sel berbasis silikon, meski performa sebenarnya bergantung pada teknologi fabrikasi, suhu operasi, dan kondisi spektrum cahaya [55].

Untuk panel berukuran 1 m^2 dengan efisiensi 20 persen pada irradiansi 1000 W/m^2 , daya maksimumnya dapat dihitung sebagai

$$P_{\max} = \eta GA$$

$$P_{\max} = 0,20 \times 1000 \times 1$$

$$P_{\max} = 200 \text{ W}$$

Angka ini membantu membaca hubungan langsung antara efisiensi, luas panel, dan intensitas cahaya. Jika luas diperbesar atau efisiensi naik, daya keluaran ikut naik selama irradiansi tetap sama [56].

f. Faktor yang Mempengaruhi Efisiensi Panel Surya

Intensitas cahaya berpengaruh kuat terhadap arus keluaran panel surya. Saat irradiansi meningkat, jumlah foton yang mengenai permukaan panel tiap detik bertambah. Kenaikan jumlah foton memperbesar pembentukan pasangan elektron-hole, sehingga arus foto naik. Tegangan juga bisa naik, tetapi kenaikannya bersifat logaritmik mengikuti persamaan V_{oc} , bukan linier seperti arus [57].

Suhu memiliki pengaruh yang berbeda. Panel surya yang terlalu panas biasanya mengalami penurunan tegangan. Secara fisik, suhu tinggi meningkatkan konsentrasi pembawa intrinsik dan arus saturasi gelap. Dalam persamaan V_{oc} , kenaikan I_0 membuat nilai logaritma menurun. Akibatnya, daya maksimum panel berkurang meski cahaya yang diterima besar [58].

Rugi optik terjadi sebelum foton menghasilkan pembawa muatan. Sebagian cahaya dipantulkan oleh permukaan kaca atau lapisan depan, sebagian diserap oleh lapisan yang tidak aktif, dan sebagian tidak mencapai daerah semikonduktor yang efektif. Lapisan anti-refleksi dipakai untuk mengurangi pantulan. Tekstur permukaan juga sering digunakan untuk memperpanjang lintasan cahaya di dalam sel [59].

Rugi elektrik muncul dari resistansi seri dan resistansi shunt. Resistansi seri berasal dari kontak logam, hambatan material, dan sambungan antar sel. Nilai R_s besar membuat tegangan efektif pada beban turun. Resistansi shunt berkaitan dengan jalur bocor internal. Nilai R_{sh} , kecil membuat sebagian arus mengalir melalui jalur bocor, bukan melalui beban. Dua rugi ini menurunkan fill factor secara nyata [60].

Rekombinasi pembawa muatan menjadi salah satu penyebab utama penurunan efisiensi. Rekombinasi dapat terjadi di bulk material, permukaan, atau daerah sambungan. Cacat kristal dan ketidakmurnian memperbesar peluang elektron dan hole bertemu kembali sebelum

dikumpulkan. Teknologi passivation dipakai untuk mengurangi cacat permukaan agar pembawa muatan memiliki peluang lebih besar mencapai kontak listrik [61].

Orientasi dan sudut kemiringan panel berpengaruh terhadap jumlah energi matahari yang diterima. Panel menghasilkan daya lebih besar saat sinar datang mendekati tegak lurus terhadap permukaan. Pada pemasangan tetap, sudut panel biasanya disesuaikan dengan posisi geografis dan pola gerak matahari. Pada sistem pelacak matahari, panel mengikuti arah matahari agar penerimaan energi meningkat sepanjang hari [62].

g. Batas Teoretis dan Perkembangan Teknologi

Efisiensi sel surya satu sambungan memiliki batas teoretis karena adanya rugi transmisi dan termalisasi. Foton dengan energi di bawah E_g tidak terserap efektif, sedangkan foton dengan energi jauh di atas E_g kehilangan energi berlebih sebagai panas. Analisis Shockley-Queisser memperkirakan batas efisiensi maksimum sel satu sambungan ideal berada di sekitar sepertiga dari energi cahaya masuk, bergantung pada nilai celah energi [63].

Salah satu cara melewati batas tersebut adalah memakai sel multi-junction. Teknologi ini menumpuk beberapa material dengan celah energi berbeda. Lapisan atas menyerap foton energi tinggi, sedangkan lapisan bawah menyerap foton energi lebih rendah. Pembagian spektrum seperti ini mengurangi rugi termalisasi dan transmisi. Sel multi-junction dapat mencapai efisiensi tinggi, meski biaya dan proses pembuatannya lebih rumit [64].

Pada teknologi silikon, peningkatan efisiensi dilakukan melalui perbaikan kualitas wafer, pengurangan rekombinasi permukaan, desain kontak belakang, lapisan passivation, dan teknik light trapping. Perkembangan seperti PERC, TOPCon, dan heterojunction memperlihatkan bahwa teknologi silikon masih berkembang meski prinsip dasarnya sudah lama dipahami. Inovasi terjadi pada cara memaksimalkan pengumpulan muatan dan mengurangi rugi optik-elektrik [65].

Material selain silikon juga berkembang, misalnya CdTe, CIGS, perovskite, dan sel organik. Masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. CdTe memiliki koefisien serapan tinggi, CIGS fleksibel dalam komposisi, perovskite menawarkan efisiensi laboratorium yang naik cepat, sedangkan sel organik menarik untuk aplikasi ringan dan fleksibel. Tantangan umum berada pada stabilitas, toksisitas, ketersediaan material, dan skala produksi [66].

h. Keterkaitan dengan Fisika Modern

Panel surya menjadi contoh kuat bahwa fisika modern tidak berhenti sebagai teori abstrak. Konsep foton, energi kuantum, pita energi, distribusi pembawa muatan, dan sambungan semikonduktor bekerja bersama dalam satu perangkat yang dapat dipasang di atap rumah. Listrik yang keluar dari panel lahir dari proses mikroskopis yang tidak terlihat langsung, tetapi dapat dijelaskan melalui persamaan kuantum dan teori semikonduktor [67].

Efek fotolistrik memberi pelajaran bahwa cahaya memiliki karakter partikel dalam interaksinya dengan elektron. Efek fotovoltaiik membawa gagasan itu ke arah teknologi. Foton tidak sekadar menyinari permukaan, melainkan mentransfer energi kepada elektron dalam struktur pita semikonduktor. Elektron yang berhasil dipisahkan dari hole lalu menjadi bagian dari arus listrik yang dapat digunakan untuk menyalakan beban [68].

Dengan membaca panel surya melalui efek fotolistrik, hubungan antara sains dasar dan kebutuhan energi menjadi lebih jelas. Satu sisi berbicara tentang energi foton, panjang gelombang, dan celah energi. Sisi lain berbicara tentang daya keluaran, efisiensi, dan sistem energi terbarukan. Dua sisi tersebut saling menyambung karena teknologi energi surya berdiri di atas hukum fisika yang sama dengan eksperimen-eksperimen awal fisika modern [69].

KESIMPULAN

Efek fotolistrik menjadi dasar konseptual untuk memahami bagaimana cahaya dapat menghasilkan respons listrik pada material. Pada panel surya, proses yang bekerja lebih tepat disebut efek fotovoltaik, yaitu pembangkitan tegangan dan arus akibat penyerapan foton oleh semikonduktor. Perbedaannya terletak pada perilaku elektron, karena elektron pada sel surya tidak keluar ke ruang bebas, melainkan dipindahkan ke pita konduksi dan dikumpulkan sebagai arus melalui rangkaian luar [70].

Energi foton mengikuti persamaan $E = hf$ atau $E = hc/\lambda$. Syarat utama pembentukan pasangan elektron-hole pada semikonduktor adalah $hf \geq E_g$. Untuk silikon dengan celah energi sekitar 1,12 eV, batas panjang gelombang yang masih efektif berada di sekitar 1100 nm. Foton berenergi lebih rendah tidak cukup untuk membangkitkan elektron, sedangkan foton berenergi jauh lebih tinggi kehilangan sebagian energi sebagai panas [71].

Sambungan p-n berperan sebagai pemisah muatan. Foton yang diserap membangkitkan elektron dan hole, kemudian medan listrik internal pada daerah deplesi memisahkan keduanya. Elektron bergerak menuju sisi n dan hole menuju sisi p. Saat rangkaian luar dipasang, pergerakan elektron melalui beban menghasilkan arus listrik. Mekanisme ini membuat sel surya mampu mengubah energi cahaya menjadi energi listrik secara langsung [72].

Kinerja panel surya dinilai melalui parameter seperti I_{sc} , V_{oc} , fill factor, daya maksimum, dan efisiensi. Hubungan dasarnya dapat ditulis sebagai $\eta = V_{oc}I_{sc}FF/(GA) \times 100\%$. Efisiensi dipengaruhi oleh intensitas cahaya, suhu, material, rekombinasi, rugi optik, resistansi seri, resistansi shunt, dan kualitas sambungan. Peningkatan kinerja panel surya selalu berkaitan dengan usaha memperbesar pembangkitan muatan, mempercepat pengumpulan muatan, serta menekan rugi-rugi [73].

Panel surya memperlihatkan penerapan fisika modern dalam teknologi energi bersih. Konsep yang dahulu muncul dari kajian radiasi, foton, dan efek fotolistrik kini menjadi dasar perangkat yang dipakai secara luas. Dari sudut pandang ilmiah, panel surya bukan sekadar alat pengubah cahaya menjadi listrik, melainkan bukti bahwa teori kuantum dan fisika semikonduktor dapat diterjemahkan menjadi teknologi yang memberi manfaat langsung bagi kebutuhan energi manusia [74].

SARAN

Kajian lanjutan dapat diarahkan pada perbandingan material sel surya seperti silikon monokristalin, polikristalin, CdTe, CIGS, dan perovskite. Pembahasan eksperimental juga dapat dilakukan dengan mengukur perubahan arus dan tegangan panel surya terhadap intensitas cahaya, suhu, sudut kemiringan, serta kondisi bayangan parsial. Pengukuran langsung akan memperkuat hubungan antara persamaan teoretis dan performa panel pada kondisi nyata [75].

REFERENSI

- [1] Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
- [3] Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9, 561–567.
- [4] Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5), 676–677.
- [5] Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132–148.
- [6] Würfel, P. (2005). *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*. Wiley-VCH.
- [7] Serway, R. A., Moses, C. J., & Moyer, C. A. (2005). *Modern Physics*. Thomson Brooks/Cole.
- [8] Planck, M. (1901). On the law of distribution of energy in the normal spectrum. *Annalen der Physik*, 4, 553–563.
- [9] Krane, K. S. (2012). *Modern Physics* (3rd ed.). Wiley.
- [10] Tipler, P. A., & Llewellyn, R. A. (2012). *Modern Physics* (6th ed.). W. H. Freeman.
- [11] Eisberg, R., & Resnick, R. (1985). *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. Wiley.
- [12] Hertz, H. (1887). Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *Annalen der Physik*, 267, 983–1000.
- [13] Lenard, P. (1902). Ueber die lichtelektrische Wirkung. *Annalen der Physik*, 313, 149–198.
- [14] Millikan, R. A. (1916). A direct photoelectric determination of Planck's h . *Physical Review*, 7(3), 355–388.
- [15] Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1965). *The Feynman Lectures on Physics, Volume III*. Addison-Wesley.
- [16] Green, M. A. (1982). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall.
- [17] Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley.
- [18] Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Wiley.

- [19] Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519.
- [20] Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2006). *Solid State Electronic Devices* (6th ed.). Pearson.
- [21] Pierret, R. F. (1996). *Semiconductor Device Fundamentals*. Addison-Wesley.
- [22] Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor Physics and Devices* (4th ed.). McGraw-Hill.
- [23] Sah, C. T., Noyce, R. N., & Shockley, W. (1957). Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45(9), 1228–1243.
- [24] Shockley, W. (1949). The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435–489.
- [25] Fahrenbruch, A. L., & Bube, R. H. (1983). *Fundamentals of Solar Cells*. Academic Press.
- [26] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). Wiley.
- [27] Markvart, T., & Castañer, L. (2003). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier.
- [28] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic Systems Engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- [29] Lorenzo, E. (1994). *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. Progensa.
- [30] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Wiley.
- [31] Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications.
- [32] Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., van Swaaij, R., & Zeman, M. (2016). *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. UIT Cambridge.
- [33] Masters, G. M. (2013). *Renewable and Efficient Electric Power Systems* (2nd ed.). Wiley.
- [34] Möller, H. J. (1993). *Semiconductors for Solar Cells*. Artech House.
- [35] Green, M. A. (1998). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. University of New South Wales.
- [36] ASTM International. (2020). *ASTM G173-03: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances*. ASTM International.

- [37] Gueymard, C. A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), 423–453.
- [38] Goetzberger, A., Knobloch, J., & Voss, B. (1998). *Crystalline Silicon Solar Cells*. Wiley.
- [39] Green, M. A. (2001). Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(2), 123–135.
- [40] Henry, C. H. (1980). Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *Journal of Applied Physics*, 51(8), 4494–4500.
- [41] Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Saunders College.
- [42] Cardona, M., & Yu, P. Y. (2010). *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. Springer.
- [43] Jenny Nelson. (2011). *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press.
- [44] Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10th ed.). Wiley.
- [45] Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). *Fundamentals of Semiconductors*. Springer.
- [46] Pankove, J. I. (1971). *Optical Processes in Semiconductors*. Dover Publications.
- [47] Hovel, H. J. (1975). *Semiconductors and Semimetals, Volume 11: Solar Cells*. Academic Press.
- [48] Aberle, A. G. (2000). Surface passivation of crystalline silicon solar cells: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(5), 473–487.
- [49] Fonash, S. J. (2010). *Solar Cell Device Physics* (2nd ed.). Academic Press.
- [50] Gray, J. L. (2003). The physics of the solar cell. In A. Luque & S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
- [51] Green, M. A. (1995). *Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice*. Centre for Photovoltaic Devices and Systems, UNSW.
- [52] Würfel, U., Cuevas, A., & Würfel, P. (2015). Charge carrier separation in solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1), 461–469.
- [53] Castaner, L., & Silvestre, S. (2002). *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*. Wiley.
- [54] Emery, K. (2003). Measurement and characterization of solar cells and modules. In A. Luque & S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
- [55] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 1–9.

- [56] Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636.
- [57] King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. Sandia National Laboratories.
- [58] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. *Solar Energy*, 83(5), 614–624.
- [59] Campbell, P., & Green, M. A. (1987). Light trapping properties of pyramidally textured surfaces. *Journal of Applied Physics*, 62(1), 243–249.
- [60] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208.
- [61] Richter, A., Hermle, M., & Glunz, S. W. (2013). Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(4), 1184–1191.
- [62] Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.). Academic Press.
- [63] Rühle, S. (2016). Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy*, 130, 139–147.
- [64] Yamaguchi, M. (2003). III-V compound multi-junction solar cells: Present and future. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75(1–2), 261–269.
- [65] Green, M. A. (2019). How did solar cells get so cheap? *Joule*, 3(3), 631–633.
- [66] Snaith, H. J. (2013). Perovskites: The emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4(21), 3623–3630.
- [67] Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2016). *Solid State Electronic Devices* (7th ed.). Pearson.
- [68] Fox, M. (2010). *Optical Properties of Solids* (2nd ed.). Oxford University Press.
- [69] Yablonovitch, E. (1982). Statistical ray optics. *Journal of the Optical Society of America*, 72(7), 899–907.
- [70] Green, M. A. (2002). *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer.
- [71] Varshni, Y. P. (1967). Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*, 34(1), 149–154.
- [72] Muller, R. S., Kamins, T. I., & Chan, M. (2003). *Device Electronics for Integrated Circuits* (3rd ed.). Wiley.

[73] Wenham, S. R., Green, M. A., Watt, M. E., & Corkish, R. (2007). *Applied Photovoltaics* (2nd ed.). Earthscan.

[74] Tsakalakos, L. (2008). Nanostructures for photovoltaics. *Materials Science and Engineering R*, 62(6), 175–189.

[75] Fraas, L., & Partain, L. (2010). *Solar Cells and Their Applications* (2nd ed.). Wiley.