

# **APLIKASI SEL SURYA**

***SISTEM SEL SURYA WEARABLE***

**FITRIA HIDAYANTI**

**BUKU AJAR**

**APLIKASI SEL SURYA:  
*SISTEM SEL SURYA WEARABLE***

**FITRIA HIDAYANTI**

**LP UNAS**

## **Aplikasi Sel Surya : *Sistem Sel Surya Wearable***

**Oleh : Fitria Hidayanti**

Hak Cipta© 2021 pada Penulis

Editor : Erna Kusuma Wati  
dan Kiki Rezki Lestari  
Penyunting : Hendra Mahendrata dan Fitri Rahmah  
Desain Cover : Rudi Ristanto

**ISBN: 978-623-7376-99-6**

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.  
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin dari Penulis.

Penerbit : LP\_UNAS  
Jl.Sawo Manila, Pejaten Pasar Minggu, Jakarta Selatan  
Telp. 021-78067000 (Hunting) ext.172  
Faks. 021-7802718  
Email : bee\_bers@yahoo.com

ISBN 978-623-7376-99-6



# KATA PENGANTAR

---

Dalam pembuatan buku ajar **Aplikasi Sel Surya: *Sistem Sel Surya Wearable*** ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah banyak membantu. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. El Amry Bermawi Putra, MA selaku Rektor Universitas Nasional
2. Wakil Rektor Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Nasional dan jajarannya
3. LP Unas
4. Jajaran dosen dan karyawan di lingkungan Universitas Nasional

Demikianlah semoga buku ajar **Aplikasi Sel Surya: Sistem Sel Surya Wearable** ini dapat bermanfaat bagi mahasiswa termasuk mahasiswa Program Studi Teknik Fisika Universitas Nasional. Tentunya dalam pembuatan buku ajar ini, tidak luput dari kesalahan. Untuk itu, kami mohon masukan dari para pembaca untuk perbaikan buku ajar ini.

Jakarta, Juni 2021

Penulis

**Fitria Hidayanti**

# DAFTAR ISI

---

Kata Pengantar .....	iii
Daftar Isi .....	v
Bab 1. Pendahuluan: Kekuatan Cahaya.....	1
1.1 Peralatan Portable, Seluler dan dapat dipakai .....	5
1.2 Dampak Sistem Sel Surya yang dapat dipakai .....	9
1.3 Kelayakan Sel Surya yang dapat dipakai .....	18
1.4 Ringkasan .....	21
Referensi .....	23
Bab 2. Fundamental.....	25
2.1 Cahaya .....	26
2.2 Bahan PV .....	33
2.3 Konversi Cahaya menjadi Energi Listrik .....	38

2.4 Desain PV Tingkat Lanjut .....	47
2.5 Kinerja Sel PV .....	52
2.6 Shading dan Ketidakteraturan Lainnya .....	56
2.7 Ringkasan .....	58
Referensi .....	59
Bab 3. Sel Surya Generasi Pertama .....	63
3.1 Silikon Monokristalin .....	64
3.2 Silikon Polikristalin .....	72
3.3 Silikon Amorf .....	73
3.4 Ringkasan .....	78
Referensi .....	79
Bab 4. Sel Surya Generasi Kedua .....	81
4.1 Galium Arsenida.....	81
4.2 Kadmium Telluride .....	86
4.3 Tembaga Indium Gallium Selenide.....	92
4.4 Ringkasan .....	94

Referensi .....	96
Bab 5. Sel Surya Generasi Ketiga .....	101
5.1 Sel PV Organik.....	101
5.2 Sel PV Peka Pewarna.....	109
5.3 Perovskit .....	115
5.4 Sel PV Quantum Dot .....	120
5.5 Ringkasan .....	127
Referensi .....	129
Bab 6. Array Sel PV .....	134
6.1 Desain Array PV Dasar.....	135
6.2 Manajemen Array .....	142
6.3 maximum Power Point Tracking .....	145
6.4 Konfigurasi Ulang Array .....	150
6.5 Ringkasan .....	153
Referensi .....	155

Bab 7. Penyimpanan Energi .....	158
7.1 Konversi DC-DC.....	160
7.2 Penyimpanan Energi.....	177
7.3 Ringkasan .....	192
Referensi .....	194
Bab 8. Teknologi yang dapat dipakai dan portabel.....	199
8.1 Ponsel .....	200
8.2 Portabel Lainnya .....	202
8.3 Peralatan yang dapat dipakai .....	205
8.4 Ringkasan .....	213
Referensi .....	215
Tentang Penulis .....	225

# **BAB 1 PENDAHULUAN :**

## **Kekuatan Cahaya**

---

Jam pintar? Pelacak kebugaran? Elektrokardiogram (EKG) portabel? Ponsel pintar? Pemantau postur? Alat bantu Dengar? Pemutar mp3? pembaca elektronik? Headset nirkabel? Jam tangan mendaki? Headset game? Pemantau tidur? Komputer laptop? Bantuan gerakan? Powerbank portabel? Tablet? Tampilan pendahuluan? Berapa banyak dari perangkat ini yang sudah Anda miliki? Berapa banyak yang belum Anda miliki tetapi masih ingin? Berapa banyak yang ingin Anda pakai sebelum Anda mengatakan cukup? Ini mungkin pertanyaan untuk dipikirkan hanya di Amazon Prime Day ketika berbagai perangkat elektronik yang menggoda muncul di hadapan Anda dengan harga murah. Atau, sebagai individu yang sering bepergian, Anda mungkin menemukan bahwa banyak dari perangkat ini meningkatkan produktivitas Anda, mendukung kesehatan yang baik, meningkatkan kualitas hidup, atau sekadar membuat hidup sedikit lebih mudah.

Tetapi apakah bank daya portabel cukup untuk memberi daya pada kebanyakan perangkat ini di masyarakat yang semakin

mobile dan serba cepat? Dan jika power bank tidak cukup, dari mana energinya? Saat Anda melihat panel surya di atap terdekat, apakah Anda bertanya-tanya apakah ada cukup cahaya dalam perjalanan sehari-hari Anda untuk mendukung daya total elektronik yang Anda bawa pada orang Anda menggunakan panel surya yang dipakai di tempat lain—tetapi pada orang Anda?

Apakah Kekuatan Cahaya Cukup?

Di satu sisi, tidak ada kekurangan orang yang akan menertawakan gagasan memasang panel surya atap di rumah tinggal di tempat seperti Seattle di mana matahari hanya bersinar rata-rata 152 hari setahun (Tempat Terbaik nd), hujan 155 hari dalam setahun, dan pada titik balik matahari musim dingin, siang hari hampir tidak lebih dari 8 jam dalam sehari (Clarridge 2016). Namun, terlepas dari cuaca kelabu suram yang melanda EmeraldCity hampir sepanjang tahun, Seattle adalah pemimpin tenaga surya di antara kota-kota dengan daya 25,7 watt (W) tenaga surya fotovoltaik (PV) terpasang per orang dan total kapasitas pembangkit listrik tenaga surya sebesar 18,1 MW. (Bradford dan Fanshaw 2018). Bagaimana ini bisa terjadi?

Seperti halnya dengan banyak teknologi, kebaikan teknologi tidak dapat disuling menjadi satu angka. Memang benar bahwa Seattle tidak mendapatkan sinar matahari terbaik di dunia—mulai dari 0,92 kWh/m<sup>2</sup>/hari di bulan Desember ke 5,88 kWh/m<sup>2</sup>/hari di bulan Juli dibandingkan dengan Phoenix, Arizona, yang berkisar dari 2,95 kWh/m<sup>2</sup>/hari di bulan Desember menjadi 7,52 kWh/m<sup>2</sup>/hari di bulan Juni (Boxwell 2019). Tapi, seberapa besar perbedaannya dalam kelayakan menyalakan rumah dengan energi matahari di dua lokasi ini. Arizona memiliki penggunaan listrik per rumah tangga sebesar 1.034 kWh/bulan, sekitar 35 kWh/hari, dan 12.408 kWh/tahun (Crees nd). Menyediakan tingkat energi ini melalui sarana surya murni.

panel surya yang bekerja pada efisiensi 16% (NREL nd). Ini mewakili kurang dari sepertiga dari atap perumahan dengan luas permukaan 241 m<sup>2</sup> berdasarkan rata-rata 2.600 kaki persegi rumah dengan garasi (Pusat Sistem Berkelanjutan nd). Dengan iklim yang jauh lebih cerah, negara bagian Washington memiliki penggunaan listrik per rumah tangga sebesar 955 kWh/bulan, sekitar 32 kWh/hari, dan 11.460 kWh/tahun (Crees nd) yang membutuhkan maksimum sekitar 217m<sup>2</sup> panel surya—sekitar 90% luas atap di rumah rata-rata (Pusat Sistem Berkelanjutan nd). Kedua contoh ini menunjukkan bahwa panel surya yang tersedia secara komersial dan teknologi dewasa yang sekarang digunakan produk ini memang dapat memberi daya pada rumah di iklim cerah dan

iklim yang lebih suram. Selain fakta dasar mengenai ketersediaan dan biaya energi surya termasuk subsidi, kebijakan dan politik juga menjelaskan mengapa beberapa kota melonjak ke depan dalam kapasitas surya, sementara yang lain tertinggal. Dalam jangka panjang, seiring dengan turunnya harga panel surya dan kemajuan teknologi yang memungkinkan lebih dari sekadar permukaan atap yang datar dan kaku ditutupi dengan sel surya dan sistem, gagasan untuk menyalakan rumah hanya dengan energi matahari menjadi jauh. kurang menggelikan (bahkan selama pendek, hujan).

Mirip dengan energi matahari di Pacific Northwest, tata surya yang dikenakan pada tubuh mungkin pada awalnya tampak menggelikan, tidak masuk akal, atau salah arah. Lagi pula, orang-orang di masyarakat maju menghabiskan lebih banyak waktu di dalam ruangan (Walden 2018) di mana akses ke energi cahaya jauh lebih rendah daripada di luar ruangan pada siang hari (Littlefair 1985; Ledke Technology Ltd. nd). Intensitas cahaya yang lebih rendah dikombinasikan dengan permintaan energi yang rendah dari perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan relatif terhadap konsumsi listrik secara keseluruhan harus membuat investasi dalam sistem sel surya yang dapat dikenakan mengambil kursi belakang untuk kemajuan dalam tata surya stasioner tradisional. Untuk peningkatan jumlah nomofobia (Yildirim dan Correia 2015) yang memiliki kecemasan perpisahan yang nyata ketika ponsel mereka berada di suatu tempat, sel surya

portabel atau yang dapat dipakai mungkin sangat penting untuk pendakian pedalaman atau aktivitas kehidupan lainnya yang terputus dari arus bolak-balik. (AC). Jika tidak, bank baterai portabel harus dapat memenuhi harapan rata-rata individu yang menggunakan gadget.

### 1.1 Perangkat Portabel, Seluler, dan Dapat Dipakai

Perbedaan antara perangkat portabel, seluler, dan perangkat wearable dulunya sudah jelas. Perangkat portabel adalah perangkat elektronik yang relatif mudah dibawa-bawa—ringan dan tidak terlalu besar. Perangkat seluler yang disebut perangkat portabel yang memungkinkan penggunaannya untuk bergerak, biasanya melalui tingkat konektivitas yang berarti, baik Wi-Fi atau seluler. Perangkat yang dapat dipakai adalah perangkat yang tidak perlu dibawa tetapi dapat tetap berada di tubuh seseorang tanpa bantuan, meskipun tanpa konektivitas ke seluruh dunia. Karena perangkat telah berevolusi untuk memiliki lebih banyak fungsi, perbedaan ini dengan cepat memudar. Misalnya, jam tangan pintar tetap berada di pergelangan tangan tanpa bantuan apa pun dari pengguna (sehingga dapat dipakai), tetapi jam tangan juga menyediakan tingkat konektivitas yang memungkinkan individu untuk terputus dari komputasi kabel (membuat jam tangan yang sama juga dapat bergerak). Komputer laptop, tanpa adanya Wi-Fi (atau hotspot pribadi) bersifat portabel tetapi tidak mobile, tetapi dapat dengan cepat menjadi mobile ketika mengendus koneksi Wi-Fi yang dapat diakses.

Sementara perbedaan antara perangkat portabel, mobile, dan wearable terus menjadi tidak jelas, penjualan perangkat ini terus meningkat. Pada tahun 2018, lebih dari 160 juta komputer notebook (Holst 2018), 172 juta perangkat yang dapat dikenakan (International Data Corporation 2019), 173,8 juta tablet (Barbaschow2019), dan 1,43 miliar smartphone (Barbaschow 2019) terjual di seluruh dunia. Untuk sebagian besar, komputer notebook/laptop dan tablet mengonsumsi daya paling besar, diikuti oleh ponsel cerdas, dengan sebagian besar perangkat wearable mengonsumsi daya paling sedikit. Satu pengecualian penting di antara perangkat yang dapat dikenakan adalah headset realitas virtual yang dapat mengonsumsi lebih banyak daya daripada komputer laptop dan memiliki masa pakai baterai hanya 2-3 jam. Sebaliknya, beberapa perangkat yang dapat dikenakan seperti alat bantu dengar dapat mengonsumsi kurang dari satu persen dari apa yang dikonsumsi laptop dan komputer tablet dan memiliki masa pakai baterai yang diukur dalam hitungan hari atau minggu. Mengingat ambiguitas istilah di antara perangkat portabel, dapat dikenakan, dan seluler, terminologi yang konsisten akan digunakan di seluruh buku ini. Istilah portabel akan digunakan untuk menggambarkan perangkat komputasi tujuan umum yang dapat dengan mudah dibawa oleh sebagian besar individu termasuk laptop, notebook, dan komputer tablet serta smartphone, ponsel flip tradisional, e-reader, dan perangkat serupa. Sebaliknya, istilah yang dapat dikenakan akan digunakan untuk menggambarkan sebagian

besar perangkat lainnya yang dapat dikenakan di kepala, lengan, telinga, pergelangan tangan, kaki, punggung, perut, dan bagian lain dari tubuh atau pakaian yang tidak memerlukan pengguna. intervensi untuk menjaga mereka di sana. Mengingat ambiguitas istilah di antara perangkat portabel, dapat dikenakan, dan seluler, terminologi yang konsisten akan digunakan di seluruh buku ini. Istilah portabel akan digunakan untuk menggambarkan perangkat komputasi tujuan umum yang dapat dengan mudah dibawa oleh sebagian besar individu termasuk laptop, notebook, dan komputer tablet serta smartphone, ponsel flip tradisional, e-reader, dan perangkat serupa. Sebaliknya, istilah yang dapat dikenakan akan digunakan untuk menggambarkan sebagian besar perangkat lainnya yang dapat dikenakan di kepala, lengan, telinga, pergelangan tangan, kaki, punggung, perut, dan bagian lain dari tubuh atau pakaian yang tidak memerlukan pengguna. intervensi untuk menjaga mereka di sana. Mengingat ambiguitas istilah di antara perangkat portabel, dapat dikenakan, dan seluler, terminologi yang konsisten akan digunakan di seluruh buku ini. Istilah portabel akan digunakan untuk menggambarkan perangkat komputasi tujuan umum yang dapat dengan mudah dibawa oleh sebagian besar individu termasuk laptop, notebook, dan komputer tablet serta smartphone, ponsel flip tradisional, e-reader, dan perangkat serupa. Sebaliknya, istilah yang dapat dikenakan akan digunakan untuk menggambarkan sebagian besar perangkat lainnya yang dapat dikenakan di kepala, lengan, telinga, pergelangan tangan, kaki, punggung, perut,

dan bagian lain dari tubuh atau pakaian yang tidak memerlukan pengguna. intervensi untuk menjaga mereka di sana. Istilah portabel akan digunakan untuk menggambarkan perangkat komputasi tujuan umum yang dapat dengan mudah dibawa oleh sebagian besar individu termasuk laptop, notebook, dan komputer tablet serta smartphone, ponsel flip tradisional, e-reader, dan perangkat serupa.

Sebagian besar perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan ditenagai oleh baterai berbasis litium dengan pengecualian perangkat yang berdaya sangat rendah (misalnya, banyak alat bantu dengar) yang terus menggunakan baterai sekali pakai. Sebagian besar baterai berbasis litium ini dapat diisi ulang dan bergantung pada stopkontak AC tradisional atau pengisi daya Universal Serial Bus (USB) yang dapat menggunakan arus searah (DC) untuk pengisian ulang. Sementara sebagian kecil dari siklus pengisian ulang baterai dapat ditelusuri kembali ke sumber energi terbarukan seperti angin dan matahari, sebagian besar melacak kembali ke batu bara dan gas alam yang tetap bertanggung jawab untuk memproduksi sebagian besar listrik di dunia. Mengingat pentingnya bagi banyak orang untuk tidak pernah mengalami kegagalan baterai saat bepergian dan meningkatnya jumlah portabel dan perangkat yang dapat dikenakan yang menanggung risiko tersebut, sumber produksi listrik yang dapat dikenakan semakin populer terkait dengan sebagian besar sumber yang dapat dikenakan ini akan

bergantung, sampai batas tertentu, pada aktivitas individu. Pemanenan energi matahari dan cahaya untuk perangkat wearable, portabel, dan elektronik tidak terkecuali. Mengingat kecilnya jumlah energi cahaya yang tersedia untuk pemanenan melalui sistem sel surya yang dapat dipakai dibandingkan dengan sistem energi surya tradisional, dampak potensial dari sistem yang dapat dikenakan pada pandangan pertama tampak sangat tidak signifikan. Tapi, melihat lebih dekat dapat mengungkapkan sebaliknya.

## **1.2 Dampak Sistem Sel Surya yang Dapat Dipakai**

### **1.2.1 Sekedar Penurunan dalam Ember Energi**

Di New York City, rata-rata smartphone dikenakan biaya 2,7 kali per orang per hari (Veloxity 2017). Kedengarannya seperti banyak? Mungkin. 2,7 kali sehari banyak dalam hal perilaku, tetapi dalam hal energi, itu tidak terlalu banyak. Pertimbangkan iPhone biasa yang memiliki kapasitas baterai sekitar 2.500 mAh (SocialCompare 2019) dan beroperasi pada sekitar 3,7 V. Pengisian penuh baterai menghabiskan energi 9,25 Wh atau 0,00925 kWh. Dengan demikian, 2,7 biaya sehari mengkonsumsi 0,025 kWh/hari dan 9,12 kWh/tahun—yang berjumlah sekitar 0,071% dari rata-rata 12.900 kWh listrik yang dikonsumsi per orang per tahun di Amerika Serikat (Bank Dunia 2014).

Untuk seorang individu di Kenya yang mengkonsumsi 164 kWh/tahun, tingkat penggunaan telepon yang sama

berjumlah sekitar 5,6% dari 164 kWh listrik yang dikonsumsi per orang per tahun (Bank Dunia 2014). Setetes lebih besar di ember, tapi tetap setetes. Dalam gambaran besar, banyak perangkat dan peralatan lain mengkonsumsi jauh lebih banyak energi daripada satu perangkat portabel atau perangkat yang dapat dikenakan. Dan, jika listrik atau penggunaan energi adalah yang terpenting dalam menyalakan perangkat ini, akan ada sedikit alasan untuk mengejar energi terbarukan untuk memberi daya pada perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan di dunia.

### **1.2.2 Masalah Kenyamanan**

Sementara listrik yang dikonsumsi oleh perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan mungkin tampak sepele, permintaan energi mereka diperparah oleh akses ke daya yang tersedia. Sebagian besar perangkat ini ditenagai oleh baterai isi ulang yang memerlukan daya AC (stopkontak) untuk diisi ulang. Akses mudah ke daya AC tidak lagi mengikuti penggunaan baterai untuk banyak orang. Besarnya ketidaknyamanan ini dan sejauh mana konsumen akan menghindari kematian baterai secara tiba-tiba, terutama dengan smartphone, tercermin dalam pasar paket baterai portabel yang berkembang pesat. Pasar untuk bank daya portabel ini diperkirakan akan tumbuh hingga lebih dari 10 miliar dolar pada tahun 2020, dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sebesar 17,5% antara tahun 2014 dan 2020.

Dan, dengan bobot sedikit lebih dari setengah pon untuk kapasitas pengisian hingga 10.000 mAh (Panduan Bank Daya 2019), bank daya ini tampaknya lebih dari cukup untuk menyelesaikan masalah kenyamanan bagi pengguna perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan. Namun, seiring dengan bertambahnya jumlah perangkat yang dibawa oleh seorang individu, demikian pula total berat perangkat dan begitu pula bobot bank daya portabel yang dapat membuat perangkat tersebut tetap terisi daya dengan sukses. Dengan tidak adanya lompatan ke depan dalam kapasitas baterai, memenuhi harapan konsumen akan pengisian yang nyaman dan dapat diakses dengan mengandalkan bank daya portabel mungkin tidak dapat dipertahankan.

### **1.2.3 Berputar Kembali ke Lingkungan**

Dorongan untuk meluasnya energi terbarukan sebagian didorong oleh semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan juga oleh dampak lingkungan yang signifikan dari bahan bakar tak terbarukan ini. Listrik yang berasal dari energi matahari atau cahaya dianggap sebagai salah satu sumber daya terbarukan yang paling bersih dan melimpah. Sumber daya terbarukan tersebut merupakan bagian penting dari membatasi kenaikan suhu global menjadi kurang dari 2°C untuk menghindari dampak bencana di planet ini (McSweeney, Pearce, dan Prater 2018). Lebih banyak energi terbarukan hanyalah sebagian dari solusi untuk mencapai

batas 2C. Emisi gas rumah kaca yang terkait dengan penggunaan bahan bakar fosil juga harus diturunkan secara signifikan menggunakan metode baru yang lebih bersih. Mengingat kemajuan listrik berbasis bahan bakar fosil dan produksi energi terbarukan yang konsisten dengan batas 2C, bahan bakar fosil masih akan melampaui energi terbarukan dalam emisi keseluruhan. Pada tahun 2050, diharapkan energi matahari hanya akan menghasilkan 6 g setara karbon dioksida (yaitu, gas rumah kaca) per kilowatt-jam listrik yang dihasilkan, sementara batubara masih akan menghasilkan 109 g gas setara karbon dioksida (Evans 2017). Selain sangat mengurangi emisi gas rumah kaca, Energi surya berbasis PV juga mengkonsumsi jauh lebih sedikit air selama produksi dan penggunaan dibandingkan dengan sejumlah besar air yang digunakan ketika batu bara dibakar untuk menghasilkan listrik. Selain itu, sementara panel surya mengkonsumsi luas permukaan, mereka tidak mengkonsumsi lahan yang dapat digunakan saat dipasang di atap atau di perangkat yang dapat dikenakan. Dan, selain emisi selama penggunaan, dampaknya terhadap polusi udara dan air minimal dibandingkan dengan cara lain untuk menghasilkan listrik. Karena sifatnya yang ramah lingkungan, karena biaya instalasi surya perumahan, baik yang berdiri sendiri maupun yang terhubung ke jaringan, terus menurun, energi surya memiliki pijakan yang kuat di masa depan energi terbarukan. Namun, mengingat sebagian kecil dari keseluruhan konsumsi listrik yang dikonsumsi portabel dan perangkat yang dapat dikenakan.

Namun, pemindahan bahan bakar fosil melalui sistem pemanenan energi yang dapat dipakai hanyalah salah satu bagian dari teka-teki dampak lingkungan. Saat ini, perangkat yang dapat dikenakan dan portabel sangat bergantung pada baterai isi ulang berbasis lithium dan baterai sekali pakai berdasarkan bahan kimia udara alkali, perak oksida, lithium, dan seng. Permintaan baterai ini meroket karena jumlah portabel dan perangkat yang dapat dikenakan berkembang biak. Dampak lingkungan dari mendukung peningkatan permintaan baterai ini sangat besar. Miliaran baterai sekali pakai dibuang setiap tahun. Sebagian besar baterai sekali pakai ini bersifat basa sehingga beberapa orang berpendapat dapat lebih mahal dalam hal lingkungan untuk mendaur ulang daripada meninggalkannya di tempat pembuangan sampah. Namun, menempatkan miliaran baterai ini di tempat pembuangan sampah juga berdampak lebih besar pada toksisitas laut, air tawar, dan darat daripada mendaur ulangnya (Xará, Almeida, dan Costa 2015), dan tentu saja lebih banyak biaya lingkungan dan penipisan sumber daya alam daripada tidak memproduksinya sama sekali. Menggabungkan volume baterai alkaline yang relatif jinak adalah sejumlah baterai kancing kecil dan sel koin yang tidak bersifat basa, dan karena ukurannya, berakhir di aliran limbah yang menuju ke tempat pembuangan sampah.

Tapi, baterai isi ulang juga bukan tanpa masalah. Baterai isi ulang yang dominan untuk perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan didasarkan pada litium termasuk teknologi ion litium dan polimer litium. Permintaan lithium

untuk memproduksi baterai ini merupakan bagian dari meningkatnya krisis mineral di dunia saat ini. Sementara litium adalah logam dan bukan mineral, ekstraksi dari cagar alam membutuhkan pemompaan berbagai macam mineral dari kerak bumi untuk menghasilkan litium karbonat yang cukup untuk ekstraksi. Proses ini menggunakan air dalam jumlah besar dan sering dilakukan di daerah kering seperti gurun. Kolam ekstraksi evaporatif yang dihasilkan yang diperlukan untuk memproses litium dapat secara serius mengurangi pasokan air lokal, merangsang konflik regional, dan menciptakan risiko besar terhadap keselamatan saluran air lokal melalui potensi kebocoran (Katwala 2018). Masalah rumit, kapasitas produksi di seluruh dunia dan pasokan lithium yang hemat biaya dan dapat diakses tidak mungkin mengimbangi permintaan lithium. Pada tahun 2025, permintaan baterai diperkirakan akan mendominasi permintaan lithium, melampaui industri kaca dan keramik yang merupakan terdepan saat ini. Meskipun tidak ada kekurangan mendasar litium di planet Bumi, ada dan akan tetap kekurangan sarana yang hemat biaya dan dapat diterima lingkungan untuk menambangnya (Clean Energy Trust 2018).

Terlepas dari dampak kelaparan global akan baterai terhadap lingkungan, dalam jangka pendek, sistem sel surya yang dapat dipakai tidak melakukan apa pun untuk mengurangi jumlah baterai (dan juga mengurangi jumlah sumber daya alam yang sesuai) yang digunakan untuk memberi daya pada sebagian

besar perangkat portabel. dan perangkat yang dapat dikenakan. Dalam implementasi awal, sistem ini hanya akan memasok daya ke baterai isi ulang yang ada, sehingga menggantikan pengisian daya AC dan konsumsi bahan bakar fosil yang biasanya menghasilkan daya AC. Namun, dalam jangka panjang, sistem ini berpotensi mengubah cara penggunaan perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan dirancang dan didukung—dengan menawarkan sumber daya yang hampir berkesinambungan yang tersedia di mana pun ada cahaya. Jumlah daya yang tersedia pada titik waktu tertentu dapat sangat bervariasi berdasarkan intensitas dan sifat pencahayaan sekitar. Namun demikian, potensi untuk memanen energi saat bepergian dapat mengubah seluruh paradigma tentang bagaimana perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan diberi daya. Penggunaan baterai, baik yang dapat diisi ulang atau tidak, menganggap tidak ada sumber daya lain yang dapat diandalkan, sehingga mengamankan penyimpanan energi jangka panjang yang konsisten, andal, dan dapat diprediksi yang hanya dapat disediakan oleh baterai berkinerja tinggi. Sistem sel surya yang dapat dipakai dapat mengurangi kebutuhan penyimpanan energi dan membuka pintu ke opsi penyimpanan energi lainnya. Misalnya, superkapasitor dapat mengambil dan mengirimkan muatan jauh lebih cepat daripada baterai dan memiliki lebih banyak siklus pengisian ulang (mis. , masa pakai lebih lama) daripada baterai biasa. Peningkatan waktu self-discharge mereka (dan periode penyimpanan energi yang lebih rendah) dibandingkan dengan baterai tradisional dapat

menjadi sangat tidak relevan dalam sistem di mana cahaya sekitar atau energi lain dipanen tidak hanya untuk memasok daya ke perangkat elektronik tetapi untuk mengimbangi self-discharge ini. . Dan, superkapasitor dapat dibuat dengan bahan yang, tidak seperti banyak bahan yang digunakan dalam baterai isi ulang, ramah lingkungan dan relatif melimpah (Dyatkin et al. 2013).

### **1.2.3 Dampak Lainnya**

Potensi portabel dan perangkat yang dapat dikenakan untuk meningkatkan kualitas hidup, sebagian, dibatasi oleh penyimpanan energi, terutama baterai. Sistem sel surya yang dapat dipakai memiliki potensi untuk membuka aplikasi baru untuk perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan dengan implikasi yang signifikan bagi masyarakat. Misalnya, proyek Tactical Assault Light Operator Suit (TALOS) yang diprakarsai oleh militer AS pada tahun 2013 berusaha untuk menyediakan baju besi taktis yang canggih dan cerdas kepada tentara di lingkungan pertempuran jarak dekat. Salah satu tujuan utama TALOS adalah untuk mengurangi cedera dan korban di antara tentara sekaligus meningkatkan efektivitas dan efisiensi operasi militer. Selain mengintegrasikan berbagai fungsi termasuk penglihatan inframerah (malam) dan pemantauan fisiologis berbasis biosensor, TALOS dimaksudkan untuk mengatur suhu di dalam setelan, secara otomatis menyesuaikan fleksibilitas setelan untuk memberikan perlindungan dari peluru dan tembakan

musuh lainnya, dan mengarahkan energi untuk memfasilitasi gerakan yang lebih gesit. Proyek ini baru-baru ini dibatalkan karena gagal menyelesaikan masalah konektivitas dan interdependensi di antara subsistem dan exosuit hanya menghabiskan terlalu banyak daya mengingat batasan ukuran dan berat yang dikenakan oleh baterai konvensional (Keller 2019). Pengembangan produk pemanen energi yang efektif dan dapat dipakai, termasuk sistem sel surya yang dapat dipakai, sangat penting untuk memberikan perlindungan yang lebih besar bagi tentara, terutama di dunia di mana taktik pertempuran terus berkembang pesat. Teknologi canggih seperti itu, meskipun awalnya dikembangkan untuk militer, juga sering diadaptasi untuk mendukung dan melindungi responden pertama sipil dalam pemadaman kebakaran, keadaan darurat medis.

Perawatan kesehatan pribadi juga mendapat manfaat dari ketersediaan energi yang lebih besar di antara perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan. Power suit yang tidak hanya merasakan parameter fisiologis tetapi juga mendukung kemudahan bergerak yang lebih besar memiliki potensi untuk memungkinkan individu yang menua mempertahankan kemandirian mereka lebih lama dan tidak menjalani hidup dengan bantuan lebih lama, sehingga mengurangi beban pada sistem perawatan kesehatan dan juga meningkatkan kualitas hidup mereka secara keseluruhan. Power suit dirancang untuk dipakai dengan nyaman dan tidak

mencolok di bawah atau di tempat pakaian biasa. Mereka berisi sensor dan motor untuk membantu individu dengan gangguan gerakan berdiri, berjalan, duduk, dan melakukan gerakan lain yang mungkin sulit (Williams 2017). Tidak mengherankan, jenis sistem yang dapat dikenakan ini memiliki kebutuhan daya yang jauh lebih besar daripada pelacak kebugaran rata-rata atau jam tangan pintar dan memerlukan pendekatan yang lebih kreatif dan tambahan untuk menemukan energi guna memenuhi kebutuhan daya tersebut. Pemantauan seluruh tubuh, yang mencakup pelacakan aktivitas otot dan jantung, mencatat postur duduk, berdiri, dan bergerak, dan bahkan penginderaan waktu nyata dari paparan lingkungan di antara fungsi-fungsi lainnya, juga membutuhkan lebih banyak daya daripada kebanyakan perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan yang tersedia secara komersial. Produk yang menyediakan fungsi semacam ini tidak dapat digunakan secara luas tanpa kemajuan teknologi pemanenan energi secara bersamaan, termasuk sistem sel surya yang dapat dipakai. Seperti banyak kemajuan teknologi lainnya, kemungkinan penuh untuk perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan belum sepenuhnya dieksplorasi.

### **1.3 Kelayakan Sistem Sel Surya yang Dapat Dipakai**

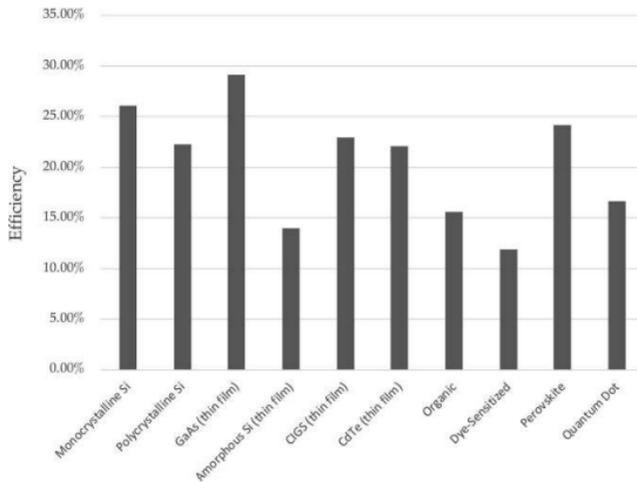
Sistem sel surya yang dapat dipakai menghasilkan daya yang cukup untuk membuat perbedaan? Di luar ruangan, jawabannya adalah ya. Energi yang diberikan sinar matahari

dapat bervariasi dari sekitar  $10\text{W}/\text{m}^2$  pada hari mendung hingga lebih dari  $1.000\text{W}/\text{m}^2$  pada hari yang cerah (Littlefair 1985). Jika hanya setengah tubuh  $1,7\text{ m}^2$  luas permukaan (Shiel 2018) ditutupi oleh sistem sel surya yang dapat dipakai dan dengan efisiensi 10% yang buruk, antara 8,5 dan 850 Wh energi akan dihasilkan selama 10 jam sehari. Setidaknya, ini adalah daya yang cukup untuk mendukung sebagian besar ponsel pintar, memasok daya ke komputer laptop selama beberapa jam, atau memberi daya pada banyak perangkat yang dapat dikenakan layar seperti alat bantu dengar selama beberapa hari.

Di dalam ruangan, masalahnya sedikit lebih menantang. Energi yang dapat disuplai oleh berbagai lampu buatan di ruang kelas dan kantor ke sistem sel surya yang dapat dipakai umumnya jauh lebih rendah daripada yang tersedia di luar ruangan, bervariasi antara sekitar 2 dan  $36\text{ W}/\text{m}^2$  (Observatorium Astronomi Optik Nasional dan; Ledke Technology Ltd. nd). Lebih dari 10 jam sehari dengan efisiensi 10% tata surya, ini berjumlah antara 1,7 dan 30,6 Wh, meningkat menjadi 2,7 dan 49 Wh untuk paparan 16 jam untuk memperhitungkan fakta bahwa pencahayaan buatan tidak dibatasi oleh ketersediaan cahaya alami. Bahkan di ujung bawah produksi energi, sistem sel surya yang dapat dipakai seperti itu menghasilkan daya yang cukup untuk mendukung penggunaan berat sebagian besar perangkat yang dapat dikenakan dan penggunaan ringan dari banyak perangkat portabel (misalnya, ponsel cerdas, tablet, komputer laptop).

Efisiensi 10% adalah perkiraan konservatif efisiensi dimana energi cahaya dapat diubah menjadi energi listrik. Performa terbaik dari sel surya modern sedikit melebihi perkiraan konservatif ini (Gambar 1.1), terutama dalam struktur sel surya yang lebih kompleks seperti sel tandem yang terdiri dari beberapa sel bilayer yang beroperasi secara bersamaan (yaitu, bersama-sama). Sementara sistem sel surya yang dapat dikenakan layak hari ini bahkan di bawah energi cahaya yang relatif rendah yang terkait dengan lingkungan yang menyala secara artifisial, kemajuan dalam teknologi sel surya akan terus mendukung sel surya dan sistem yang lebih efisien di masa depan.

Tata surya portabel telah diperkenalkan ke pasar komersial, menyediakan daya antara 20 dan 120 W di bawah sinar matahari kondisi ideal. Diterjemahkan menjadi energi, 100 W 550 Wh/hari di lokasi outdoor yang cerah di lokasi outdoor yang lebih berawan di barat panel surya akan menghasilkan sekitar Arizona dan sekitar 350 Wh/hari negara bagian Washington (Solaris nd). Produksi energi saat panel ini terkena pencahayaan dalam ruangan akan berkurang secara signifikan.



**GAMBAR 1.1**  
Efisiensi konversi energi sel surya. Efisiensi sel penelitian terbaik ditunjukkan untuk sel surya (PV) sambungan bilayer yang dibuat dalam berbagai teknologi, berdasarkan data dari National Renewable Energy Laboratory (NREL 2019). Sel tandem yang terdiri dari beberapa sel sambungan bilayer yang beroperasi secara bersamaan tidak ditampilkan tetapi menunjukkan efisiensi setinggi 39,2%.

## 1.4 Ringkasan

Sementara kekuatan sinar matahari lebih dari cukup untuk memberi energi pada sebagian besar perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan menggunakan sistem sel surya yang dapat dikenakan, sebagian besar individu menghabiskan banyak waktu mereka di dalam ruangan jauh dari sumber energi yang kaya dan berlimpah ini. Namun, semuanya tidak hilang, karena kekuatan cahaya juga ada di dalam ruangan dalam cahaya sekitar, termasuk yang

dihasilkan dari sumber fluorescent, pijar, dan lightemitting diode (LED). Memahami kekuatan cahaya dan kapasitas sel surya PV untuk mengubah cahaya ini menjadi energi listrik dimulai dengan gambaran tentang perilaku dasar cahaya dan operasi dasar sel PV (Bab 2). Efisiensi dan variasi lain dalam konversi energi cahaya menjadi energi listrik sangat tergantung pada bahan PV yang mendasari konstruksi sel PV termasuk silikon (bagian 3), semikonduktor anorganik lainnya (Bab 4), dan bahan lainnya (Bab 5). Karena sel PV tunggal tidak akan pernah membuat panel surya, beberapa diskusi tentang desain dan manajemen array (Bab 6) dijamin dalam konteks sistem sel surya yang dapat dikenakan. Setelah itu, output dari susunan sel PV biasanya harus diubah dari satu tegangan DC ke tegangan DC lainnya sebelum mengisi baterai atau perangkat penyimpan energi lainnya (Bab 7) yang kemudian memberikan daya yang konsisten ke berbagai perangkat elektronik (Bab 8). Dan, akhirnya, dengan mempertimbangkan semua elemen tata surya ini, memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kemampuan sistem sel surya yang dapat dipakai dan bagaimana mereka harus dirancang untuk mencapai kinerja terbaik (Bab 9). Baik sistem sel surya yang dapat dikenakan hanya berfungsi untuk menenangkan kecemasan nomofobia atau membuka pintu ke aplikasi baru yang secara langsung memperpanjang rentang hidup dan kualitas hidup, pertimbangan dan desainnya merupakan upaya yang berharga dan menantang yang berada di luar jalur desain atap stasioner.

## Referensi

Barbaschow, Asha. 2019. "Smartphone Market 'a Mess' but Annual Tablet Sales Are Also Down." ZDNet. February 1, 2019. <https://www.zdnet.com/article/smartphone-market-a-mess-but-annual-tablet-sales-are-also-down/>

Best Places. n.d. "Climate in Seattle, Washington." Accessed March 8, 2019. <https://www.bestplaces.net/climate/city/washington/seattle>.

Boxwell, Michael. 2019. "Solar Irradiance Calculator." In Solar Electricity Handbook. London, England: Greenstream Publishing. <http://www.solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html>.

Bradford, Abi, and Bret Fanshaw. 2018. "Shining Cities 2018: How Smart Local Policies Are Expanding Solar Power in America." <https://patch.com/us/across-america/here-are-americas-winners-solar-energy>

Center for Sustainable Systems. n.d. "Residential Buildings Factsheet." Accessed March 8, 2019. <http://css.umich.edu/factsheets/residential-buildings-factsheet>.

Dyatkin, Boris, Volker Presser, Min Heon, Maria R. Lukatskaya, Majid Beidaghi, and Yury Gogotsi. 2013. "Development of a Green Supercapacitor Composed Entirely of Environmentally Friendly Materials." *ChemSusChem* 6 (12): 2269– 2280. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300852>

Holst, Arne. 2018. "Global Notebook Shipments 2016–2018." Statista. August 27, 2018. <https://www.statista.com/statistics/818424/global-notebook-computershipments/>

Keller, Jared. 2019. "SOCOM's Iron Man Suit Is Officially Dead." *Task & Purpose*. <https://taskandpurpose.com/talos-iron-man-suit-dead>

## BAB 2 FUNDAMENTAL

---

Meskipun ada lebih dari satu pendekatan untuk memanfaatkan energi matahari atau cahaya, pendekatan fotovoltaik (PV) sejauh ini adalah yang paling umum. Teknologi PV mengandalkan efek PV untuk mengubah energi matahari atau cahaya menjadi listrik. Efek PV mengacu pada eksitasi elektron dalam suatu material oleh cahaya yang masuk (iradiasi) dan terkait erat dengan efek fotolistrik, di mana keduanya melibatkan eksitasi elektron dari energi rendah ke energi tinggi. Dalam efek fotolistrik, bagaimanapun, sebuah elektron tereksitasi ke tingkat vakum atau ruang bebas (yaitu, sepenuhnya dibebaskan dari materi), sedangkan dalam efek PV, elektron berenergi atau tereksitasi tetap terkait atau terkait dengan materi di mana awalnya disimpan dalam keadaan istirahat atau energi rendah.

Berbagai macam desain dan strategi digunakan untuk memanfaatkan efek PV untuk menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan. Namun, terlepas dari desain, struktur, atau bahan komponennya, sel PV berperilaku dengan cara yang sangat mirip. Cahaya bergerak ke (menerangi) sel PV. Cahaya diubah menjadi elektron berenergi. Elektron berenergi tinggi ini kemudian dikumpulkan di tepi (kontak) sel PV dan ditransfer ke sirkuit eksternal untuk diubah menjadi energi listrik yang berguna. Seberapa baik proses ini berlangsung di dalam sel PV tergantung pada sifat cahaya yang masuk,

peluang cahaya untuk memberi energi pada elektron, dan kapasitas sel PV untuk mempertahankan dan mengumpulkan elektron yang diberi energi daripada kehilangannya untuk rekombinasi.

## **2.1 Cahaya**

Sel PV membutuhkan cahaya untuk berfungsi dan berguna. Cahaya dijelaskan oleh sifat dasar dan karakteristik perilaku yang dapat diukur baik secara absolut (yaitu, tidak tergantung pada mata manusia) atau relatif (yaitu, tergantung pada sensitivitas mata manusia).

Pengukuran relatif atau fotometrik cahaya dilakukan dalam satuan seperti lumen, lux, dan foot-candle yang menskalakan cahaya berdasarkan bagaimana mata manusia merespons cahaya tersebut. Misalnya, 1 watt (W) cahaya pada 555 nanometer (nm) (yaitu, lampu hijau) setara dengan 683 lumen, sedangkan pada 510 nm, jumlah cahaya yang sama (1 W) adalah sekitar 340 lumen karena mata manusia hanya sekitar setengah sensitif terhadap cahaya 510 nm seperti cahaya 555 nm. Karena kepekaan mata manusia terhadap cahaya sebagian besar tidak relevan dengan kinerja sel PV, unit fotometrik ini sama-sama tidak relevan dengan operasi dan kinerja sel PV. Sebaliknya, pembahasan sel PV lebih cocok untuk unit radiometrik atau absolut seperti watt untuk menggambarkan energi cahaya masukan. Tidak seperti lumen,

1W cahaya pada 500 nm sama dengan 1W cahaya pada 555 nm—energi 1 J/dtk.

### **2.1.1 Sifat Dasar Cahaya**

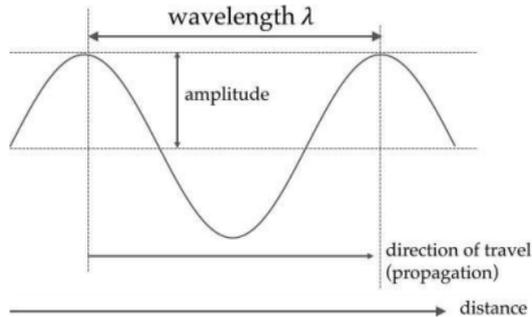
Cahaya dapat dijelaskan dengan sifat dasar intensitas, frekuensi, panjang gelombang, dan kecepatan.

Intensitas hanya mengacu pada jumlah energi cahaya. Satuan yang paling umum digunakan dalam deskripsi intensitas dalam konteks perilaku sel PV adalah energi radiasi (energi cahaya dalam Joule atau J), the fluks radiasi atau daya (energi cahaya per satuan waktu dalam watt), dan kerapatan fluks radiasi atau radiasi (fluks radiasi yang mencapai permukaan per satuan luas dalam  $W/m^2$ ). Istilah intensitas sering digunakan secara lebih informal untuk menggambarkan beberapa sifat cahaya lainnya yang dapat membingungkan.

Warna sumber cahaya (termasuk matahari) dikaitkan dengan panjang gelombang atau panjang gelombang cahaya yang dipancarkannya. Ketika digambarkan sebagai gelombang (Gambar 2.1), cahaya memiliki panjang gelombang ( $\lambda$ ) diwakili oleh jarak antara dua puncak yang berdekatan pada gelombang dan dinyatakan dalam satuan nm atau mikrometer ( $\mu m$ ).

Kecepatan gelombang adalah jumlah puncak yang melewati suatu titik tetap dalam ruang per waktu (dalam m/s), dan kecepatan ( $v$ ) menyatakan kecepatan dan arah dari

gelombang. frekuensi gelombang ( $f$ ) berhubungan dengan panjang gelombang dan kecepatan ( $v$ ) sebagai berikut



**GAMBAR 2.1**

Sifat dasar cahaya. Amplitudo gelombang adalah jarak antara posisi diam dan perpindahan maksimum gelombang dari posisi diam tersebut dalam arah tegak lurus arah rambat gelombang. Panjang gelombang ( $\lambda$ ) adalah jarak antara titik-titik tetangga yang identik pada gelombang seperti jarak antara puncak yang berdekatan. Frekuensi ( $f$ ) adalah jumlah gelombang yang bergerak melewati titik tertentu dalam ruang setiap detik dan kecepatan atau kecepatan gelombang ( $v$ ) hanyalah produk dari panjang gelombang dan frekuensi dalam arah perjalanan gelombang.

$$f = v/\lambda \quad (2.1)$$

Di udara, kecepatan gelombang cahaya kira-kira sama dengan kecepatan cahaya dalam ruang hampa ( $c$ ) dan bernilai  $3 \times 10^8$  m/dtk. Dalam media lain yang lebih padat, kecepatan cahaya terkait dengan indeks bias ( $RI$ ) materi itu dan kecepatan cahaya dalam ruang hampa:

$$v = c/RI \quad (2.2)$$

Kecepatan dan kecepatan cahaya dalam media padat selalu lebih lambat dari kecepatan dan kecepatan cahaya di udara

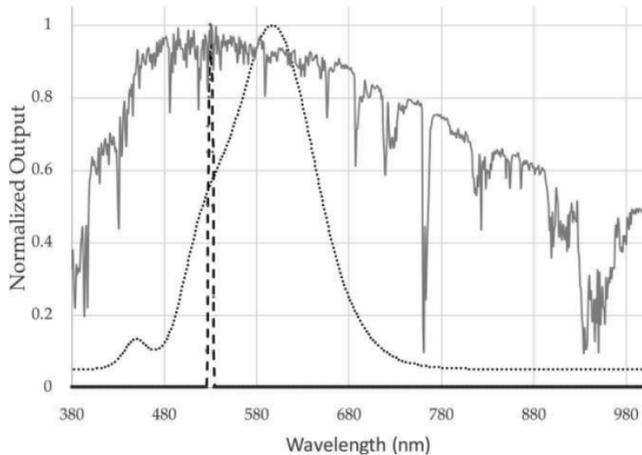
atau dalam ruang hampa, tetapi frekuensi cahaya tetap konstan terlepas dari media yang dilalui cahaya. Sebagian besar sumber cahaya merupakan kombinasi dari cahaya yang merambat pada frekuensi yang berbeda dan memiliki panjang gelombang yang berbeda. Laser datang paling dekat untuk terdiri dari satu panjang gelombang cahaya dengan bandwidth yang sangat sempit, sedangkan sinar matahari luas, dengan panjang gelombang mulai dari ultraviolet melalui wilayah yang terlihat ke dalam spektrum inframerah. Dan, sumber cahaya lain, seperti LED, mengandung panjang gelombang dengan bandwidth yang lebih luas daripada laser tetapi tidak seluas sinar matahari (Gambar 2.2).

Terlepas dari luasnya spektrum yang dipancarkan oleh sumber cahaya, panjang gelombang komponen bertambah bersama untuk menghasilkan warna yang diamati oleh mata manusia. Kombinasi panjang gelombang yang berbeda dapat menghasilkan warna yang sama. Oleh karena itu, persepsi warna saja tidak secara unik mengidentifikasi panjang gelombang cahaya yang ada dalam sumber cahaya. Sumber cahaya yang mengandung rentang panjang gelombang yang lebar di daerah yang terlihat biasanya dianggap putih, tetapi sumber cahaya yang mengandung rentang panjang gelombang yang lebih sempit dapat terlihat seperti warna apa pun di pelangi. Misalnya, dioda pemancar cahaya hijau (LED) didominasi oleh panjang gelombang antara 550 dan 600 nm, dan warnanya sangat jelas terlihat sebagai hijau. Sebaliknya, sinar matahari mengandung kombinasi cahaya tampak dengan panjang gelombang antara 400 dan 750 nm yang bila

digabungkan, membuat sinar matahari terlihat putih atau mendekati putih. Sinar matahari juga mengandung panjang gelombang di luar daerah cahaya tampak termasuk sinar inframerah hingga 2500 nm dan sinar ultraviolet (panjang gelombang lebih pendek dari 400 nm).

### **2.1.2 Karakteristik Perilaku Cahaya**

Saat cahaya bergerak melalui bahan atau media yang berbeda dan menemui rintangan, ia dapat menunjukkan berbagai perilaku. Perilaku yang paling relevan untuk diskusi sel PV adalah refleksi, transmisi, dan penyerapan. Cahaya yang memantul kembali dari permukaan tanpa ditransmisikan atau diserap dipantulkan. Beberapa cahaya dipantulkan dalam arah tertentu, sementara cahaya lainnya (terutama pada permukaan kasar) memantul kembali dalam berbagai arah dan dikatakan tersebar.



**GAMBAR 2.2**  
Warna cahaya. Warna atau komposisi spektral dari beberapa sumber cahaya umum termasuk sinar matahari terestrial berdasarkan AM1.5 (Laboratorium Energi Terbarukan Nasional [NREL] nd).

Terlepas dari apakah cahaya dihamburkan atau dipantulkan dari permukaan sel PV, semua cahaya tersebut hilang sebagai sumber energi potensial ke sel. Dari cahaya yang tidak dipantulkan, sebagian ditransmisikan tidak berubah melalui sel PV dan sebagian lagi diserap oleh sel PV. Untuk silikon dan semikonduktor lainnya, cahaya yang diserap diubah menjadi pasangan pembawa arus bebas yang disebut pasangan lubang elektron. Cahaya yang berhasil diserap oleh suatu material hanya diserap dalam paket energi diskrit yang disebut foton. Energi satu foton  $E$  diberikan oleh hubungan Planck-Einstein:

$$E = hc/\lambda \quad (2.3)$$

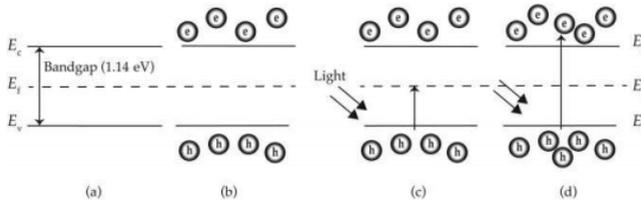
dimana  $h$  adalah konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J-dtk atau  $4.14 \times 10^{-15}$  eV-dtk),  $c$  adalah kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s), dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang dalam meter. Sebuah bahan harus menyerap sejumlah foton bilangan bulat. Jika energi setara dengan 3,5 foton cahaya yang mengenai suatu bahan, jumlah maksimum foton yang dapat diserap adalah 3; sisa energi senilai 0,5 foton tetap tidak diserap dan ditransmisikan melalui materi.

enyinaran cahaya input menentukan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sel PV. Dalam situasi ideal, 1 m<sup>2</sup> Sel PV terpapar 1 W/m<sup>2</sup> cahaya input akan menghasilkan daya output 1 W. Namun pada kenyataannya, ada banyak kerugian berbeda yang terjadi pada sel PV nyata yang secara signifikan mengurangi seberapa banyak cahaya input dapat diubah menjadi daya output. Misalnya, sel PV dasar khas yang terbuat dari silikon (monokristalin) menghasilkan daya keluaran maksimum sekitar 0,25 W untuk setiap watt sinar matahari masukan. Kemana perginya semua energi yang terbuang? Sejauh ini, "pemborosan" daya terbesar yang dikeluarkan oleh teknologi PV terjadi karena ketidaksesuaian antara bagaimana dan seberapa banyak sel PV menyerap cahaya dan bagaimana dan seberapa banyak sumber cahaya memancarkan cahaya sebagai fungsi dari panjang gelombang.

## 2.2 Bahan PV

Pertimbangkan perilaku silikon monokristalin yang beroperasi sebagai sel PV untuk memanfaatkan cahaya atau energi matahari. Pada suhu nol mutlak (0 K) dan kondisi penerangan nol (tidak ada cahaya), semua elektron dalam semikonduktor berada pada tingkat energi rendah di pita valensi silikon (Gambar 2.3a). Dengan meningkatnya suhu, beberapa elektron memperoleh energi panas dan pindah ke pita konduksi energi yang lebih tinggi (Gambar 2.3b) tetapi tidak ke dalam celah pita. Celah pita adalah karakteristik mendasar dari semikonduktor dan mewakili kisaran energi yang dilarang untuk elektron. Pada kenyataannya, beberapa keadaan energi memang ada di celah pita, tetapi untuk tujuan diskusi ini, energi celah pita akan dianggap kosong,

Ketika silikon terkena cahaya, foton dapat memiliki panjang gelombang yang energinya lebih kecil dari energi celah pita (Gambar 2.3c). Dalam hal ini,



**GAMBAR 2.3**

Pita energi dalam silikon murni (tidak tertutup). (a) Pada nol mutlak (0 K), tidak ada pembawa arus (yaitu elektron atau lubang bebas); (b) pada suhu yang lebih tinggi, beberapa pembawa arus bebas tersedia; (c) dengan adanya cahaya masuk yang energinya lebih rendah dari celah pita, jumlah pembawa arus bebas tidak berubah; dan (d) dengan adanya cahaya masuk yang energinya lebih besar dari energi celah pita, jumlah pembawa arus bebas bertambah. Fermi tingkat ( $E_f$  menunjukkan rasio elektron bebas untuk lubang bebas dalam semikonduktor. Dengan tidak adanya cahaya, silikon intrinsik murni mengandung jumlah elektron bebas yang sama dengan lubang bebas, yang menempatkan tingkat Fermi di tengah celah pita.

elektron tidak dapat melewati celah pita. Ia tetap dalam keadaan energi istirahat dan foton tidak diserap. Menggunakan hubungan Planck-Einstein (Persamaan 2.3), panjang gelombang cahaya maksimum yang dapat diserap oleh silikon (bandgap 1,14 eV) adalah  $1,09 \times 10^{-6}$  meter atau 1.090 nm. Cahaya yang lebih panjang dari 1.090 nm tidak memiliki energi foton yang cukup untuk melintasi celah pita dan tidak diserap. Ini berarti bahwa sebagian besar cahaya inframerah yang menyinari sel PV silikon tidak dapat diserap. Sinar matahari memiliki komponen cahaya inframerah yang signifikan yang membatasi kemampuan silikon untuk menyerap dan mengubah sinar matahari menjadi energi listrik (Gambar 2.2).

Cahaya dapat diserap dan menyediakan energi yang cukup (per foton) bagi elektron untuk menyeberang dari tepi atas pita valensi ke tepi bawah pita konduksi. Ini adalah

penyerapan cahaya yang paling efisien dan tidak menghasilkan energi yang terbuang, tetapi hanya terjadi pada panjang gelombang tertentu. Lebih mungkin, cahaya yang diserap memiliki lebih dari energi minimum yang dibutuhkan elektron untuk melintasi celah pita (Gambar 2.3d). Dalam skenario ini, elektron yang terlalu bersemangat kehilangan energi sebagai panas karena turun ke energi yang lebih rendah di pita konduksi. Kelebihan energi ini, yang hilang sebagai panas, merupakan sumber tambahan inefisiensi dalam semikonduktor. Sayangnya, celah pita semikonduktor yang memungkinkan cahaya dimanfaatkan menjadi energi juga menyebabkan kerugian yang signifikan pada semua energi yang lebih besar atau lebih kecil daripada energi celah pita. Dengan demikian, tidak mengherankan bahwa untuk sinar matahari yang mengandung rentang panjang gelombang yang luas dari ultraviolet hingga inframerahdekat, silikon, paling banter, dapat mengubah maksimum 32% cahaya yang masuk menjadi daya keluaran, sehingga kehilangan minimal 68% dari cahaya yang masuk. energi sinar matahari yang masuk menjadi panas atau kurang penyerapannya (Rühle 2016). Efisiensi tertinggi 32% dapat dianggap sebagai hasil dari ketidakcocokan mendasar antara bagaimana sinar matahari berperilaku dan bagaimana sel PV bereaksi atau merespons. Efisiensi tertinggi berbeda untuk sumber cahaya buatan daripada untuk sinar matahari dan bergantung pada seberapa baik cakupan spektral sel PV cocok dengan sumber cahaya buatan.

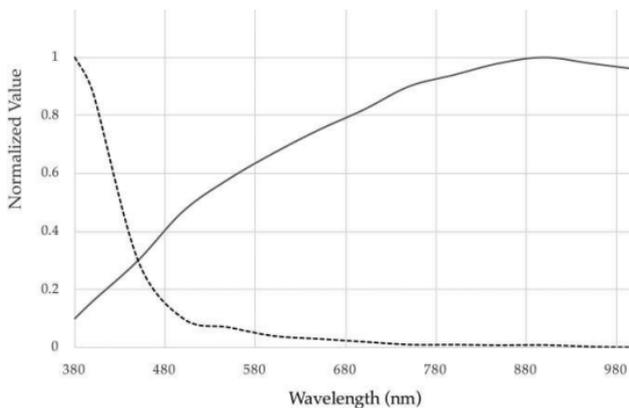
Terlepas dari ketidakcocokan mendasar ini, cahaya yang berjalan dengan gembira menuju sel PV menghadapi banyak hambatan lain untuk diubah menjadi listrik. Yang pertama dari hambatan ini terjadi di permukaan sel. Sementara sebagian besar cahaya sampai ke area aktif sel PV, beberapa dipantulkan. Jumlah yang dipantulkan daripada ditransmisikan ke dalam sel terkait dengan indeks bias dari dua media yang dilalui cahaya. Persentase cahaya yang melewati bahan 1 (biasanya udara) dan dipantulkan dari sel PV yang lapisan permukaannya terbuat dari bahan 2 kira-kira:

$$R = 100\% \times \left[ \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right]^2 \quad (2.4)$$

dimana  $n_1$  adalah indeks bias bahan 1 dan  $n_2$  adalah indeks bias material 2. Untuk sel PV silikon dengan indeks bias sekitar 4 yang terpapar ke udara pada panjang gelombang 600 nm, sekitar 36% cahaya dipantulkan dari permukaan dan hilang ke sel PV. Untuk mengurangi kerugian refleksi, lapisan anti-reflektif dapat disimpan di atas permukaan sel PV. Dalam kasus silikon, lapisan silikon dioksida antireflektif (dengan indeks bias antara 1,4 dan 1,55) akan mengurangi kerugian refleksi awal hingga serendah 2,8%. Menggabungkan kerugian ini, panjang gelombang cahaya yang panjang mungkin tidak sepenuhnya diserap dalam sel PV tipis, karena koefisien penyerapannya cukup kecil dibandingkan dengan panjang gelombang yang lebih pendek (Gambar 2.4). Jumlah cahaya yang diserap tergantung pada panjang gelombang cahaya

yang melewati sel dan juga kedalaman cahaya yang masuk ke dalam sel. jika area aktif sel PV dimulai dari jarak  $z_1$  (cm) dan memanjang ke jarak  $z_2$  (cm) di bawah permukaan sel, jumlah total cahaya yang tersedia untuk diserap dapat dijelaskan dengan penerapan hukum Beer:

$$I_{available} = I_0 \exp(-\alpha z_1) - I_0 \exp(-\alpha z_2) \quad (2.5)$$



**GAMBAR 2.4**

Respon silikon terhadap cahaya. Ditampilkan adalah sifat penyerapan silikon pada 300 K berdasarkan data dari (Green 2008) dan respon silikon terhadap cahaya pada berbagai panjang gelombang berdasarkan data dari (Boivin et al. 1986). Koefisien penyerapan maksimum silikon sekitar 106 cm<sup>-1</sup> pada panjang gelombang pendek (yaitu di bawah 400 nm) dan menunjukkan seberapa tebal silikon harus menyerap semua cahaya pada panjang gelombang tersebut. Respons menunjukkan bagaimana arus foto yang dihasilkan oleh cahaya dengan radiasi yang sama bervariasi dengan panjang gelombang.

dimana  $I_0$  adalah intensitas insiden cahaya pada permukaan sel PV (setelah kerugian refleksi diperhitungkan) dan  $\alpha$  adalah koefisien penyerapan PV (dalam cm<sup>-1</sup>) dan bergantung pada panjang gelombang. Panjang gelombang yang lebih pendek

diserap lebih dekat ke permukaan sel PV dan memiliki koefisien penyerapan yang lebih tinggi. Panjang gelombang yang lebih panjang membutuhkan lebih banyak kedalaman ke dalam sel PV untuk diserap dan memiliki koefisien penyerapan yang lebih rendah. Dan, panjang gelombang yang sangat panjang tidak diserap sama sekali karena foton cahaya pada panjang gelombang tersebut kekurangan energi yang cukup untuk melintasi celah pita dalam bahan PV aktif. Perilaku penyerapan silikon (Gambar 2.4) menunjukkan perbedaan ini di seluruh panjang gelombang seperti halnya semikonduktor lain serta bahan PV alternatif. Singkatnya, sebagian besar sel PV mengalami kehilangan cahaya yang luar biasa bahkan sebelum cahaya memiliki kesempatan untuk diubah menjadi arus listrik di lapisan aktif sel. Sebagian cahaya dipantulkan. Sebagian cahaya diserap oleh lapisan sel yang tidak aktif. Beberapa cahaya ditransmisikan melalui sel seluruhnya. Meskipun kerugian ini diminimalkan dalam sel PV komersial, namun memiliki dampak pada efisiensi.

### **2.3 Konversi Cahaya menjadi Energi Listrik**

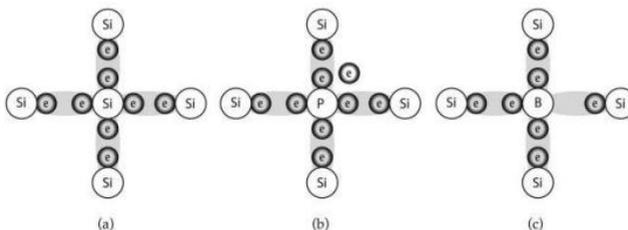
Sel PV mengubah cahaya menjadi energi listrik dengan merangsang elektron untuk menyerap energi cahaya dan dengan demikian berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi daripada keadaan istirahatnya. Meskipun asal dan tujuan elektron yang bergerak dari tingkat energi yang lebih rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi dapat terlihat berbeda

dalam teknologi PV yang berbeda, perilaku PV yang mendasarinya adalah sama.

Sel PV berdasarkan semikonduktor anorganik mendominasi pasar PV global. Lebih dari 90% produksi PV di seluruh dunia didasarkan pada semikonduktor silikon kristal (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems 2019), sementara di Amerika Serikat, lebih dari setengah produksi PV didasarkan pada silikon mono atau multikristalin dengan 24% lainnya. berdasarkan semikonduktor kadmium telluride (Platzer 2015). Karena dominasi pasar dan kematangan teknologi, perilaku PV silikon kristal dipahami dengan baik dan membuat titik tolak yang logis untuk memahami teknologi sel PV lainnya. Silikon memiliki nomor atom 14, merupakan bagian dari golongan 14 dalam tabel periodik, dan merupakan unsur paling melimpah kedua di kerak bumi sekitar 28% dari total massa. Atom silikon memiliki dua elektron pada kulit penuh pertamanya, delapan di kulit penuh kedua, dan empat elektron di kulit terakhir (kosong sebagian). Untuk mencapai kulit terluar penuh yang sangat diinginkan dan stabil, silikon akan berikatan dengan empat atom silikon tetangga dengan total delapan elektron di kulit terluarnya (Gambar 2.5a). Dalam keadaan ini, silikon stabil dan relatif terisolasi, dengan sedikit elektron yang tersedia di pita konduksi untuk menghantarkan arus. Ketika cahaya dengan energi yang sesuai menyinari silikon, setiap paket (foton) energi cahaya yang berhasil diserap oleh silikon menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita energi konduksi. Dengan melakukan begitu, elektron berenergi (eksitasi) meninggalkan kekosongan (atau lubang) di

pita valensi yang berfungsi sebagai mekanisme untuk elektron dalam pita valensi untuk "melompat" dari kekosongan ke kekosongan dan dengan demikian menghantarkan arus. Namun, dalam satu lapisan silikon polos, elektron tereksitasi dalam pita konduksi tidak bertahan cukup lama (yaitu, tetap diberi energi) untuk dikumpulkan pada kontak sel PV. Sebaliknya, sebagian besar elektron hilang dan kembali ke pita valensi di mana mereka bergabung kembali dengan lubang. Untuk setiap sel PV, baik sel tunggal, ganda, atau berlapis ganda, kemampuan untuk secara efektif mengumpulkan pembawa bebas (elektron dan hole) dinyatakan sebagai efisiensi kuantum eksternal (EQE) dari sel PV:

$$EQE = \frac{\text{Electrons / sec}}{\text{Photons / sec}} \quad (2.6)$$

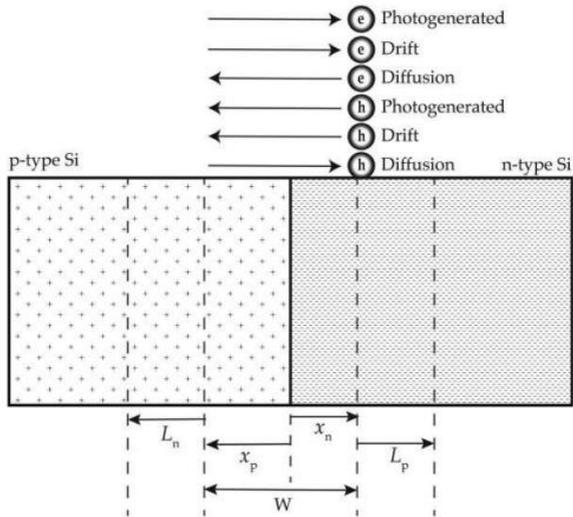


**GAMBAR 2.5**

silikon, (a) Silikon yang tidak didoping; (b) elektron ekstra dalam silikon tipe-n yang didoping dengan atom fosfor; (c) lubang ekstra pada silikon tipe-p yang didoping dengan atom boron.

EQE silikon lapisan tunggal cukup buruk karena banyak pasangan lubang elektron tidak pernah dikumpulkan karena rekombinasi, tetapi EQE dapat ditingkatkan dengan membentuk sambungan antara dua jenis silikon yang berbeda: satu tipe-p dan satu tipe-n. silikon tipe-p (Gambar 2.5c) dibuat dengan penambahan atom (akseptor) yang memiliki tiga elektron di kulit terluar (misalnya, boron), dan menciptakan satu ketiadaan elektron (yaitu, lubang) di pita valensi kristal per atom akseptor yang ditambahkan. silikon tipe-n (Gambar 2.5b) dibuat dengan penambahan atom (donor) yang memiliki lima elektron di kulit terluar (misalnya, fosfor) dan membuat satu elektron tambahan di pita konduksi kristal per atom donor yang ditambahkan.

Penambahan atom dopan (donor atau akseptor) meningkatkan konduktivitas silikon. Untuk setiap atom donor yang ditambahkan ke silikon yang tidak didoping, konduktivitas meningkat dengan adanya satu elektron pembawa arus tambahan. Untuk setiap atom akseptor yang ditambahkan, konduktivitas meningkat dengan adanya satu lubang pembawa arus tambahan (tetapi lebih lambat dan kurang bergerak). Konduktivitas semikonduktor yang dihasilkan dapat disesuaikan atau disetel dengan mengontrol jumlah atom dopan dalam semikonduktor.



**GAMBAR 2.6**

Elektron dan lubang pada sambungan pn. Difusi menyebabkan elektron mengalir dari kanan ke kiri (sisi-n persimpangan ke sisi-p persimpangan) dan hole dari kiri ke kanan. Drift melawan difusi dan menyebabkan elektron mengalir dari kiri ke kanan dan hole dari kanan ke kiri. Hasil akhirnya adalah keseimbangan dinamis di mana difusi dan drift menyeimbangkan satu sama lain pada potensi bawaan. Cahaya yang masuk menghasilkan pasangan lubang elektron di sepanjang sambungan pn. Pasangan elektron-lubang dalam wilayah penipisan dan dalam satu panjang difusi dari batas-batasnya jauh lebih kecil kemungkinannya untuk bergabung kembali dan lebih mungkin berhasil dikumpulkan untuk produksi listrik yang berguna.

Namun, ketika material tipe-p dan tipe-n digabungkan bersama, mereka menciptakan sel PV yang lebih efisien melalui medan listrik yang muncul di persimpangan antara kedua material. Pertimbangkan sambungan pn sederhana di mana silikon tipe-n disambungkan ke silikon tipe-p (Gambar 2.6). Pada saat kedua bahan disambung, tidak ada medan listrik pada sambungan dan bahan tipe-p dan tipe-n keduanya netral secara listrik. Namun, elektron segera berdifusi dari sisi

n yang kaya elektron pada sambungan ke sisi p yang miskin elektron. Dengan demikian, elektron-elektron ini membawa muatan negatifnya dan meninggalkan muatan positif. Pemisahan muatan ini (positif pada sisi-n dan negatif pada sisi-p) merangsang perpindahan elektron kembali ke sisi-n persimpangan tempat mereka berasal karena muatan yang berlawanan saling tarik-menarik. Difusi dan drift berlanjut dalam keseimbangan dinamis yang mempertahankan level yang muatan negatif pada sisi-p sambungan dan muatan positif pada sisi-n sambungan.

Persimpangan ditandai oleh dua parameter utama. Yang pertama adalah area fisik di dekat sambungan pn di mana elektron telah bergabung kembali dengan hole, tanpa meninggalkan pembawa muatan bebas. Daerah fisik ini disebut daerah penipisan dan tergantung pada jenis bahan dan doping pada setiap sisi sambungan. Lebar total wilayah ini diwakili oleh berikut: hubungan rendah:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q}(\phi_0)\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)} \quad (2.7)$$

dimana  $\epsilon$  adalah permitivitas relatif semikonduktor (misalnya, 11,7 untuk silikon),  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang bebas ( $8,85 \times 10^{-14}$  F/cm),  $\phi_0$  adalah potensi built-in yang terkait dengan persimpangan pn,  $q$  adalah muatan elektronik ( $1,6 \times 10^{-19}$  Coulomb), dan  $N_a$  dan  $N_d$  adalah tingkat doping pada sisi-p dan sisi-n sambungan, masing-masing, dalam satuan atom/cm<sup>3</sup>.

Bagian dari penipisan lebar daerah yang terletak pada sisi-n persimpangan adalah:

$$x_n = W \frac{N_a}{N_a + N_d} \quad (2.8)$$

and the portion of the depletion region width that lies on the p-side of the junction is:

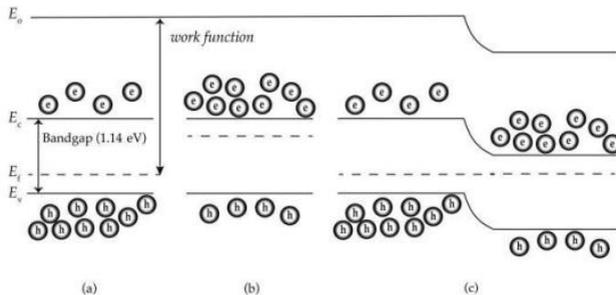
$$x_p = W \frac{N_d}{N_a + N_d} \quad (2.9)$$

The built-in potential across the p-n junction can be calculated as:

$$\phi_i = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (2.10)$$

dimana T adalah suhu dalam kelvin, k adalah konstanta Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K) dan  $n_i$  adalah konsentrasi pembawa intrinsik (sekitar  $1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$  untuk silikon pada suhu kamar). Potensi bawaan dapat divisualisasikan dengan melihat struktur pita energi silikon tipe-p dan tipe-n sebelum dan sesudah sambungan pn terbentuk. Struktur pita dapat dicirikan oleh: energi pita konduksi ( $E_c$ ), energi pita valensi ( $E_v$ ), tingkat Fermi ( $E_f$ ), tingkat vakum ( $E_0$ ), dan fungsi kerja ( $\phi$ ). Tingkat vakum mewakili energi elektron yang tidak terikat pada bahan apa pun (yaitu, dalam vakum sempurna) dan fungsi kerja mewakili perbedaan energi antara Fermi dan tingkat vakum. Tingkat Fermi adalah tingkat energi yang memiliki probabilitas 0,5 terisi dan mencerminkan energi yang kemungkinan yang sama untuk diisi oleh elektron sebagai lubang. Pada kebanyakan semikonduktor, tingkat Fermi berada di celah pita yang, menurut definisi, tidak mengandung atau sangat sedikit elektron atau lubang. Definisi yang lebih

praktis dari tingkat Fermi untuk semikonduktor adalah bahwa ia mewakili energi rata-rata elektron bebas dan lubang di semikonduktor, dan posisinya di celah pita mencerminkan rasio elektron bebas untuk lubang bebas. Untuk semikonduktor murni yang tidak didoping (intrinsik).



**GAMBAR 2.7**  
 Pandangan energi persimpangan pn. Struktur pita energi untuk (a) silikon tipe-p, (b) silikon tipe-n, dan (c) sambungan pn silikon. Semikonduktor lain memiliki celah pita yang berbeda ( $E_g$ ) tetapi menunjukkan perilaku yang sama ketika dibuat menjadi sambungan pn.

$E_f$  duduk di tengah celah pita (Gambar 2.3). Karena semikonduktor tipe-p didominasi oleh lubang bebas (pembawa arus),  $E_f$  duduk jauh di bawah tengah celah pita dan dekat dengan energi pita valensi dalam tipe-p semikonduktor (Gambar 2.7a), dan dalam semikonduktor tipe-n, berlaku sebaliknya (Gambar 2.7b).

Namun, ketika silikon tipe-p dan tipe-n digabungkan bersama, tingkat Fermi harus kontinu melintasi persimpangan, menyebabkan tingkat energi  $E_c$  dan  $E_v$  di satu sisi persimpangan untuk ditekuk  $E_c$  dan  $E_v$  di seberang persimpangan (Gambar 2.7c). Pembengkokan pita ini

menciptakan bukit energi yang tingginya sama dengan potensial bawaan ( $\phi_{bi}$ ) persimpangan pn dan memungkinkan elektron mengalir menuruni bukit energi dan lubang melayang ke atas bukit. Di bawah kondisi yang melestarikan bukit energi yang ditunjukkan pada persimpangan pn di Gambar 2.7c, lubang akan mengapung ke atas ke kiri melalui sisi p persimpangan dan elektron akan mengalir ke bawah ke kanan melalui sisi n persimpangan.

Potensial bawaan menghasilkan medan listrik maksimum ( $E$ ) melintasi persimpangan yang cukup besar.

Sementara potensi built-in bervariasi antara sekitar 0,56 dan 1,04 V dari doping ringan hingga silikon yang didoping berat, lebar daerah penipisan cukup kecil (di urutan sepersepuluh mikrometer), yang menghasilkan medan listrik di urutan puluhan ribu. dari volt per cm.

Cahaya menyinari seluruh pn junction. Ketika diserap, satu foton menciptakan elektron berenergi di pita konduksi dan lubang yang tersisa di pita valensi. Bersama-sama, elektron bebas dan lubang bebas disebut pasangan elektron-lubang. Jauh dari sambungan pn, silikon bertindak seperti sel PV satu lapis. Dengan tidak adanya medan listrik yang signifikan, elektron dan lubang dengan cepat bergabung kembali dan tidak mungkin dikumpulkan pada kontak di kedua ujung sel PV. Namun, lebih dekat ke persimpangan (yaitu, di dalam daerah penipisan atau dalam satu panjang difusi itu) di mana medan listrik cukup besar, elektron dan lubang yang dihasilkan oleh cahaya didorong menjauh satu sama lain oleh medan

listrik built-in dan dapat lebih siap melakukan perjalanan ke kontak masing-masing. Gambar 2.6).

Silikon dan sel PV semikonduktor lainnya memanfaatkan medan listrik internal dan daerah penipisan yang muncul ketika semikonduktor yang didoping berlawanan digabungkan. Namun, dalam satu atau lain cara, semua sel PV bergantung pada perilaku dasar yang sama ini. Setelah pasangan elektron-lubang dihasilkan, gaya tertentu harus ada dalam sel PV untuk secara efektif memisahkan elektron dari lubang dan kemudian mengangkutnya ke kontak masing-masing sambil kehilangan sesedikit mungkin untuk rekombinasi. Sambungan pn silikon melakukan ini dengan cukup baik dengan efisiensi kuantum internal mendekati 100% (yaitu, rasio elektron yang dihasilkan per detik terhadap foton yang diserap per detik) pada panjang gelombang cahaya tampak (Holman et al. 2013) dan efisiensi konversi energi secara keseluruhan (yaitu, rasio daya yang dihasilkan terhadap daya cahaya yang masuk) mencapai setinggi 26,1% (NREL 2019).

## **2.4 Desain PV Tingkat Lanjut**

Secara umum, bahan PV satu lapis tidak efisien karena sebagian besar elektron dan lubang bergabung kembali sebelum dapat dikumpulkan dan diubah menjadi energi listrik. Dalam sel PV bilayer (misalnya, persimpangan pn semikonduktor), rekombinasi berkurang, dan lebih banyak

pasangan elektron-lubang yang dihasilkan oleh cahaya berhasil dikumpulkan. Sementara desain sel PV bilayer dapat dioptimalkan untuk mendapatkan efisiensi konversi energi yang tinggi, arsitektur lain di luar desain bilayer juga memungkinkan untuk memanfaatkan cahaya secara lebih efisien. Dua dari pendekatan yang lebih populer untuk melampaui kemampuan desain bilayer adalah sel PV tandem (multiple-junction) dan penggunaan konsentrator.

### **2.4.1 Sel Tandem**

Beberapa sambungan pn dapat ditumpuk bersama dan dioperasikan bersama satu sama lain untuk mengumpulkan dan memanfaatkan lebih banyak cahaya yang masuk. Di dalam struktur sel tandem, sambungan bilayer ditumpuk, satu di atas yang lain, dengan sambungan bilayer yang lebih rendah (yaitu, sambungan lebih jauh dari cahaya yang masuk) mengumpulkan foton berenergi rendah yang, menurut sifatnya, diserap lebih dalam ke sel dan persimpangan bilayer atas mengumpulkan foton energi tinggi yang diserap lebih dekat ke permukaan sel PV. Sel tandem ini dapat dihubungkan secara seri secara elektrik, tetapi sambungan seri mengharuskan arus yang melalui sel harus sama. Ketidcocokan dalam sel dapat menyebabkan arus di satu sel berkurang agar sesuai dengan yang lain, sehingga menghasilkan satu atau lebih sel yang beroperasi di luar titik daya optimal (maksimum). Atau, sel tandem dapat dioperasikan secara individual tanpa dihubungkan secara seri.

Meskipun membutuhkan lebih banyak kabel daripada sel yang terhubung seri, sel tandem individu lebih fleksibel baik dalam desainnya maupun dalam sumber cahaya yang dapat diakomodasi pada penyerapan dan efisiensi yang optimal. Sel PV yang menggunakan desain tandem dua sel memiliki kemungkinan efisiensi (ultimate) maksimum sebesar 47% (Bremner, Levy, dan Honsberg 2008) dan sel penelitian yang menggunakan desain tandem tersebut telah menunjukkan efisiensi setinggi 32,8%, 37,9%, dan 39,2% untuk desain dua, tiga, dan empat sel, masing-masing (NREL 2019).

#### **2.4.2 Konsentrator Surya**

Pemusatan cahaya ke dalam sel surya juga meningkatkan efisiensi sel PV. Lensa Fresnel dan optik lainnya dapat digunakan untuk mengumpulkan cahaya dari area yang lebih besar dari luas permukaan sel PV. Optik kemudian memfokuskan atau memusatkan cahaya yang dikumpulkan langsung ke sel PV, sehingga meningkatkan radiasi sel secara keseluruhan. Dalam instalasi panel surya tradisional yang melibatkan banyak sel PV dan panel surya yang terhubung bersama, optik konsentrator menawarkan alternatif yang lebih murah karena optik konsentrat seringkali lebih murah per satuan luas daripada sel PV. Dalam sistem konsentrator, lebih sedikit sel PV dan panel surya yang dapat digunakan untuk mengumpulkan jumlah cahaya yang pada dasarnya sama. Namun, konsentrator surya membutuhkan cahaya langsung untuk beroperasi secara efisien. Cahaya langsung

mengacu pada cahaya yang diterima pada garis lurus antara matahari dan perangkat pengumpul (yaitu, optik pemusatan). Dengan demikian, sistem konsentrator memerlukan alat pelacak untuk menyesuaikan orientasi sel PV pemusatan sepanjang hari untuk memaksimalkan paparan sinar matahari langsung (Philipps et al. 2015). Kebutuhan cahaya langsung membatasi sistem konsentrator ke wilayah kaya sinar matahari di dunia, tetapi sistem konsentrator ini telah menunjukkan efisiensi sel penelitian setinggi 46% (NREL 2019). Namun, terbatasnya pada cahaya langsung juga membuat pendekatan konsentrator tidak praktis untuk sistem PV yang dapat dikenakan. PV yang dapat dikenakan tidak mungkin menerima banyak cahaya langsung dan pelacak yang dipasang pada sistem kecil seperti itu tidak praktis dan mahal baik dari segi biaya maupun berat. Perubahan orientasi yang sering terjadi pada sistem seluler dan perangkat yang dapat dikenakan juga memperumit pelacakan yang efisien dan pemusatan cahaya yang tersedia.

### **2.4.3 Strategi Lainnya**

Strategi untuk mengurangi rekombinasi juga digunakan untuk meningkatkan efisiensi sel PV. Sementara sambungan pn massal bekerja dengan baik untuk silikon dan semikonduktor lainnya karena panjang difusinya yang panjang, panjang difusi untuk beberapa bahan PV sangat pendek, sehingga membatasi area aktif untuk mengumpulkan elektron dan lubang bebas. Dalam bahan tersebut (misalnya, sel PV

organik), persimpangan tersebar bekerja lebih baik. Dalam sambungan terdispersi, akseptor elektron dan bahan donor elektron dicampur bersama untuk membentuk lapisan tunggal dari banyak sambungan pendek. Dengan persimpangan pendek seperti itu, jarak yang harus ditempuh oleh elektron yang difotogenerasi untuk mencapai persimpangan di mana ia dapat dipisahkan dari lubangnya yang sesuai berkurang secara drastis. Hasil dari, lebih sedikit elektron dan lubang yang bergabung kembali dan sel PV mampu melakukan efisiensi yang wajar (Nelson 2003). Dalam teknologi sel PV lainnya, penggunaan lapisan mesopori menguntungkan untuk mengumpulkan cahaya dan mengubahnya secara efisien menjadi energi listrik. Lapisan mesopori mengandung pori-pori yang biasanya berdiameter antara 2 dan 50 nm. Ukuran pori ini memungkinkan molekul di dalam lapisan untuk dilapisi dengan pewarna fotosensitif atau bahan lain sementara masih memungkinkan ion untuk melakukan perjalanan melalui lapisan untuk mengisi elektron yang telah diangkut keluar dari sel PV untuk pengumpulan dan konversi ke arus yang dapat digunakan (McEvoy 2003). Lapisan mesopori mengandung pori-pori yang biasanya berdiameter antara 2 dan 50 nm. Ukuran pori ini memungkinkan molekul di dalam lapisan untuk dilapisi dengan pewarna fotosensitif atau bahan lain sementara masih memungkinkan ion untuk melakukan perjalanan melalui lapisan untuk mengisi elektron yang telah diangkut keluar dari sel PV untuk pengumpulan dan konversi ke arus yang dapat digunakan (McEvoy 2003). Lapisan mesopori mengandung pori-pori yang biasanya berdiameter

antara 2 dan 50 nm. Ukuran pori ini memungkinkan molekul di dalam lapisan untuk dilapisi dengan pewarna fotosensitif atau bahan lain sementara masih memungkinkan ion untuk melakukan perjalanan melalui lapisan untuk mengisi elektron yang telah diangkat keluar dari sel PV untuk pengumpulan dan konversi ke arus yang dapat digunakan (McEvoy 2003).

## 2.5 Kinerja Sel PV

Beberapa karakteristik berbicara tentang keunggulan satu sel PV di atas yang lain dan banyak dari evaluasi semacam itu bergantung pada aplikasi. Jauh dan jauh, bagaimanapun, metrik paling populer yang digunakan untuk membandingkan satu teknologi PV dengan yang lain pada tingkat sel tunggal adalah efisiensi konversi energi, yang diberikan oleh:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.11)$$

dimana  $P_{out}$  adalah daya listrik yang dihasilkan oleh sel PV dan  $P_{in}$  adalah daya optik yang masuk, keduanya diukur dalam satuan watt. Konversi energi efisiensi  $\eta$  tidak memiliki kesatuan dan sering disebut efisiensi.

Daya keluaran sel PV tidak konstan, melainkan bervariasi dengan arus yang melalui dan tegangan melintasi sel, yang keduanya bervariasi dengan beban yang terpasang pada sel. Tegangan sel PV dapat bervariasi antara 0 dan tegangan

rangkaian terbuka (arus nol) ( $V_{oc}$ ) dan arus dapat bervariasi antara 0 dan arus hubung singkat (tegangan nol) ( $I_{sc}$ ). Daya yang dihasilkan oleh sel PV pada kondisi rangkaian terbuka adalah:

$$P_{out} = I_{cell}V_{cell} = 0 \times V_{oc} = 0 \quad (2.12)$$

yang tidak berguna untuk produksi listrik. Demikian pula, sel PV tidak berguna beroperasi pada kondisi hubung singkat di mana daya keluaran juga nol, karena tegangan sel adalah nol. Di suatu tempat di antara dua ekstrem ini adalah titik produksi daya maksimum atau MPP (Gambar 2.8). Idealnya, sel PV harus beroperasi pada MPP-nya setiap saat untuk memastikan produksi daya maksimum dalam kondisi pencahayaan dan lingkungan apa pun. Dalam prakteknya, menemukan MPP memerlukan memvariasikan resistansi beban yang melekat pada sel dari 0 ohm hingga nilai resistansi yang sangat besar saat sel disinari dengan cahaya. Pada beban 0 ohm, sel beroperasi di bawah arus pendek kondisi cuit dan arus yang mengalir melalui sel adalah  $I_{sc}$ . Pada tahanan beban yang sangat besar, sel beroperasi pada kondisi rangkaian terbuka dan tegangan umur seluruh sel adalah  $V_{oc}$ . Di antara kedua ekstrem ini terdapat MPP yang digunakan untuk menilai efisiensi konversi energi (maksimum) dari sel PV-nya. Efisiensi sel penelitian yang disediakan oleh NREL (NREL 2019) sebagaimana dikutip di seluruh buku ini adalah efisiensi konversi energi berdasarkan sinar matahari (AM1.5) sebagai lampu input dan pada  $P_{out}$  sesuai dengan MPP. Efisiensi

konversi energi untuk sumber cahaya selain sinar matahari terestrial akan berbeda.

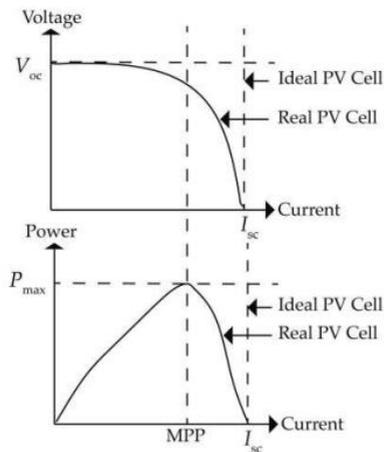
Efisiensi konversi energi pada dasarnya terbatas pada nilai di bawah 100%. Untuk sel PV bilayer tunggal, efisiensi maksimum yang dapat dicapai adalah efisiensi tertinggi (juga dikenal sebagai batas Shockley-Queisser) dari 33,7% (Rühle 2016). Efisiensi tertinggi hanya dapat dicapai jika celah pita bahan PV yang mendasarinya secara optimal disesuaikan dengan sumber cahaya yang masuk. Untuk sinar matahari, kecocokan optimal ini terjadi pada celah pita sekitar 1,34 eV (Rühle 2016).

1,34 eV (Rühle 2016). Selain efisiensi konversi energi, parameter lain yang relevan untuk mengevaluasi kinerja sel PV adalah faktor pengisian (FF). FF dapat dihitung dimana  $P_{keluar}$ , maks adalah daya yang dihasilkan oleh sel pada titik daya maksimum (Gambar 2.8) dan  $V_{oc}$  dan  $I_{sc}$  adalah tegangan rangkaian terbuka (dalam volt) dan arus hubung singkat (dalam ampere) untuk sel, masing-masing. FF memberikan indikasi tion kualitas sel PV dan berkisar dari 50% sampai lebih dari 80% dalam sel PV modern. Sel PV silikon monokristalin telah menunjukkan FF setinggi 83% (Polman et al. 2016).

$$FF = \frac{P_{out,max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.13)$$

Untuk mengoptimalkan kinerja sel PV, celah pita bahan PV harus disesuaikan dengan sumber cahaya input, kerugian

pantulan harus diminimalkan, dan beban ke sel PV harus disesuaikan sehingga sel beroperasi pada MPP tidak peduli apa kondisi cahaya input. Sebuah sel PV yang beroperasi pada kondisi terbaiknya, baik sebagai perangkat tunggal atau sebagai bagian dari sistem yang lebih besar yang berisi banyak sel PV, beroperasi pada MPP-nya sepanjang waktu. Dalam operasi praktis, bagaimanapun, tidak ada sel PV yang beroperasi pada kondisi terbaiknya sepanjang waktu.



**GAMBAR 2.8**

Produksi daya dalam sel PV. Saat arus melalui sel PV berkurang, tegangan meningkat sampai tidak ada arus yang mengalir dan tegangan mencapai maksimum pada tegangan rangkaian terbuka  $V_{oc}$ . Pada tegangan nol, arus mencapai maksimum pada arus hubung singkat  $I_{sc}$ . Produk maksimum tegangan dan arus adalah titik daya maksimum ( $P_{maksimum}$ ).

## **2.6 Shading dan Ketidakteraturan Lainnya**

Berbagai variabel lingkungan, manufaktur, dan desain dapat menyebabkan sel PV beroperasi pada kondisi yang kurang optimal. Sangat jarang sel PV beroperasi dalam isolasi sebagai sistem sel tunggal. Namun, kurva karakteristik sel PV, bahkan ketika dirancang dan dibuat agar identik, berbeda dari batch ke batch dan sel ke sel. Variasi manufaktur berarti bahwa di bawah iradiasi input dan beban output yang identik, hanya beberapa sel PV yang akan beroperasi pada MPP-nya. Satu-satunya cara untuk memastikan bahwa setiap sel dalam larik beroperasi pada kondisi terbaiknya adalah dengan mengintegrasikan kontrol MPP ke setiap sel, tetapi ruang, daya, dan biaya yang terlibat dalam melakukannya mungkin menjadi penghalang. Masalah rumit lebih lanjut, dalam banyak susunan sel PV, sel-sel dihubungkan secara seri, yang mengharuskan semua sel mengalirkan arus yang sama. Jadi, bahkan di bawah kondisi penyinaran yang identik, sel-sel yang terhubung seri ini (string) tidak akan dapat beroperasi pada MPP individu mereka dan MPP kolektif dari string akan kurang dari jumlah MPP di masing-masing sel individu. Ketidakteraturan lingkungan di beberapa sel dan tidak yang lain memiliki efek yang sama pada produksi daya seperti variasi manufaktur. Bayangan, ketidakmurnian, dan penuaan adalah tiga sumber umum ketidakteraturan lingkungan yang dapat menyebabkan sel PV beroperasi pada MPP yang berbeda. Ketidakteraturan lingkungan ini bisa sangat ekstrem sehingga menciptakan titik panas dalam susunan sel PV yang dapat mencuri daya dari sistem daripada menambahnya.

Kinerja sel PV juga diperparah dengan pemanasan. Panel surya atap konvensional memanaskan di bawah sinar matahari langsung yang menurunkan tegangan rangkaian terbuka dan sebagai hasilnya, output daya maksimumnya. Efek pemanasan sendiri berarti bahwa panel surya sering beroperasi jauh di atas suhu lingkungan dengan efisiensi yang turun sekitar 0,26% per derajat Celsius peningkatan suhu (Panasonic nd).

Dalam instalasi PV stasioner, semua faktor ini (panas, kekotoran, naungan, penuaan, variasi manufaktur) ikut berperan dan mempengaruhi produksi daya keseluruhan sistem sel surya. Dalam sistem PV yang dapat dikenakan, beberapa sumber potensial penurunan kinerja ini diminimalkan. Sistem yang dapat dikenakan kurang rentan terhadap efek negatif dari pemanasan sendiri karena mereka lebih jarang terkena suhu lingkungan yang tinggi dan tingkat sinar matahari langsung yang relatif tinggi yang dialami oleh atap dan instalasi luar ruangan lainnya. Sistem PV yang dapat dipakai juga menghabiskan lebih sedikit waktu di luar ruangan dan lebih jarang terpapar kondisi cuaca buruk, yang juga mengurangi kerugian kinerja yang diakibatkan oleh kekotoran. Di samping itu, banyak sistem PV yang dapat dipakai lebih rentan terhadap tingkat naungan yang lebih sering dan lebih bervariasi karena mereka bergerak daripada diam. Lebih lanjut, sistem PV yang dapat dipakai sering kali dibuat fleksibel agar sesuai dengan berbagai topologi tidak beraturan dan oleh karena itu lebih rentan terhadap ketidakaturan yang dihasilkan dari waktu ke waktu akibat penuaan, retak, dan kerusakan lainnya.

## 2.7 Ringkasan

Terlepas dari bahan atau arsitektur komponennya, sel PV bergantung pada efek PV untuk mengubah cahaya yang masuk menjadi pembawa arus bebas yang dapat dikumpulkan dan diubah menjadi listrik yang berguna. Teknologi PV paling matang menggunakan silikon monokristalin yang dibuat dalam struktur dua lapis yang disebut sambungan pn. Sambungan pn silikon tunggal telah ditunjukkan dengan efisiensi konversi energi lebih dari 26% dan berpotensi mencapai efisiensi sekitar 32%. Beberapa struktur dua lapis atau sambungan pn silikon dapat melampaui efisiensi 32% dan ditumpuk di atas satu sama lain dalam apa yang disebut sel tandem.

Meskipun dominasi silikon kristalin dalam sel surya komersial, bentuk lain dari silikon dan semikonduktor lainnya telah dikembangkan dalam sel PV generasi kedua berdasarkan film tipis. Bahan dan struktur alternatif yang sama sekali berbeda membentuk sel PV generasi ketiga yang seperti sel generasi kedua, pada akhirnya dapat bersaing dengan silikon.

## Referensi

Boivin, L. Philippe, Wolfgang Budde, C. X. Dodd, and S. R. Das. 1986. "Spectral Response Measurement Apparatus for Large Area Solar Cells." *Applied Optics* 25 (16): 2715–2719. <https://doi.org/10.1364/AO.25.002715>.

Bremner, S. P., M. Y. Levy, and C. Bo Honsberg. 2008. "Analysis of Tandem Solar Cell Efficiencies under AM1.5G Spectrum Using a Rapid Flux Calculation Method." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16 (3): 225–233.

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2019. "Photovoltaics Report." <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

Green, Martin A. 2008. "Self-Consistent Optical Parameters of Intrinsic Silicon at 300K Including Temperature Coefficients." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92 (11): 1305–1310. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.009>.

Holman, Z. C., A. Descoedres, S. De Wolf, and C. Ballif. 2013. "Record Infrared Internal Quantum Efficiency in Silicon Heterojunction Solar Cells With Dielectric/Metal Rear Reflectors." *IEEE Journal of Photovoltaics* 3 (4): 1243–1249. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2276484>.

McEvoy, A. J. 2003. "Photoelectrochemical Solar Cells." In *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Nelson, Jenny. 2003. "Organic and Plastic Solar Cells." In *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 484–511. Boca Raton, Florida: CRC Press.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2019. "Best Research-Cell Efficiency." <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). n.d. "Reference Air Mass 1.5 Spectra." Accessed July 16, 2019. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.

Panasonic. n.d. "N335 HIT® + Series." Accessed July 5, 2019. <https://na.panasonic.com/us/energy-solutions/solar/hit-series/n335-hitr-series>.

Philipps, Simon P., Andreas W. Bett, Kelsey Horowitz, and Sarah Kurtz. 2015. "Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology." NREL/ TP-5J00-65130, 1351597. <https://doi.org/10.2172/1351597>.

Platzer, Michaela D. "U.S. Solar Photovoltaic Manufacturing: Industry Trends, Global Competition, Federal Support." Congressional Research Service, January 31, 2015.

Polman, Albert, Mark Knight, Erik C. Garnett, Bruno Ehrler, and Wim C. Sinke. 2016. "Photovoltaic Materials: Present Efficiencies and Future Challenges." *Science* 352 (6283). <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>.

Rühle, Sven. 2016. "Tabulated Values of the Shockley–Queisser Limit for Single Junction Solar Cells." *Solar Energy* 130: 139–147

## BAB 3

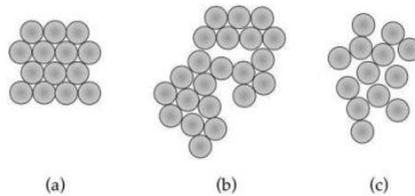
# SEL SURYA GENERASI PERTAMA

---

Sel fotovoltaik (PV) pertama dibuat dan didemonstrasikan oleh fisikawan Prancis Edmond Becquerel pada tahun 1839. Namun, lebih dari satu abad kemudian pada tahun 1954 teknologi PV mengambil lompatan maju di Amerika Serikat ketika Bell Labs mendemonstrasikan sel surya pertama untuk menyalakan perangkat elektronik. Pada akhir 1950-an, sel-sel PV generasi pertama ini diproduksi secara komersial dari silikon kristal (US Department of Energy [DOE] nd) dan struktur serupa terus berkembang secara komersial saat ini. Teknologi generasi pertama berdasarkan silikon kristal sekarang sudah matang. Pada 93% pangsa pasar global (DOE nd), bentuk kristal silikon mendominasi instalasi energi surya tradisional dengan margin yang sangat lebar. Silikon kristal dapat mengambil salah satu dari dua bentuk dalam sel PV: monokristalin atau polikristalin (Gambar 3.1a dan b). Silikon amorf (Gambar 3.1c) adalah bentuk silikon nonkristalin yang tidak teratur yang juga dapat digunakan untuk membuat sel PV yang layak secara komersial, tetapi dianggap sebagai bagian dari sel surya generasi kedua.

### **3.1 Silikon Monokristalin**

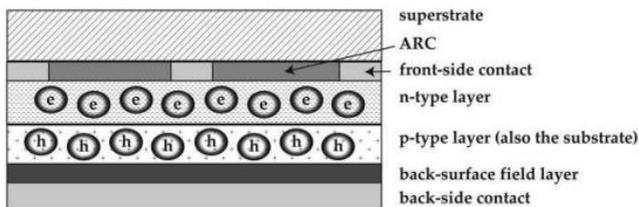
ementara satu lapisan silikon mampu menghasilkan elektron dan lubang pembawa arus dengan menyerap foton cahaya yang masuk, sebagian besar elektron dan lubang ini akan bergabung kembali satu sama lain sebelum dapat dikumpulkan sebagai arus listrik yang berguna. Untuk mengurangi rekombinasi, dua jenis silikon yang berbeda sering dibuat untuk membentuk sambungan. Sambungan tunggal semacam itu terdiri dari satu lapisan silikon tipe-p yang dibuat berdekatan dengan satu lapisan silikon tipe-n. Kedua lapisan tipe-p dan tipe-n terdiri dari bahan kristal yang tersusun rapi, kontinu, tidak terputus yang terbentuk dan tumbuh dari satu biji silikon dengan kemurnian tinggi. Lapisan tipe-p didoping dengan atom akseptor (kaya lubang) seperti boron dan lapisan tipe-n didoping dengan atom donor (kaya elektron) seperti fosfor. Gambar 3.2. Lapisan yang tersisa dalam struktur sel PV (Tabel 3.1) dirancang untuk menyediakan lingkungan yang menguntungkan secara energetik bagi lubang untuk mengalir ke bagian belakang sel dan elektron mengalir ke bagian depan sel PV.



**GAMBAR 3.1**  
 Berbagai bentuk silikon digunakan dalam sel PV. Derajat keteraturan dalam struktur silikon menurun dari (a) silikon monokristalin menjadi (b) silikon polikristalin menjadi (c) silikon amorf.

Cahaya memasuki sel PV melalui superstrat transparan seperti kaca. Di bawah kaca adalah lapisan lapisan antireflektif yang meminimalkan hilangnya cahaya oleh refleksi. Silikon nitrida adalah pilihan umum untuk lapisan antireflektif ini karena sangat kompatibel dengan proses fabrikasi silikon dan indeks biasanya memberikan sifat antireflektif yang sangat baik. Kontak logam (misalnya, perak, aluminium) yang dibuat ke sisi depan atau atas sel PV membuat koneksi ke sel PV lain dan ke sirkuit eksternal. Kontak sisi depan ini dipola sedemikian rupa sehingga hanya menutupi sebagian kecil dari permukaan sel PV untuk memungkinkan sebagian besar cahaya melewati sambungan pn yang bekerja (aktif). Fungsi kontak sisi depan adalah untuk mengumpulkan elektron yang dihasilkan di lapisan aktif sel. Lapisan aktif dibuat di bawah lapisan antireflektif dan kontak sisi depan dan terdiri pertama dari lapisan silikon tipe-n dan kemudian lapisan tipe-p, meskipun lapisan ini dapat ditukar atau dibalik dalam beberapa struktur sel PV. Sepanjang keseluruhan bilayer (pn) junction, cahaya diserap sebagai foton, menghasilkan pasangan

elektronlubang. Namun, dalam jarak tertentu dari sambungan pn, pasangan lubang elektron ini tetap terpisah cukup lama sehingga sebagian besar dapat melakukan perjalanan ke kontak sisi depan dan belakang dan kemudian ke sirkuit eksternal untuk diubah menjadi listrik yang berguna.



**GAMBAR 3.2**

Struktur sel PV silikon. Dua lapisan silikon yang didoping (tipe-p dan tipe-n) menyerap cahaya dalam sel PV silikon. Rekombinasi diminimalkan oleh aksi dari potensial dan medan listrik built-in di persimpangan pn. Kontak sisi depan mengumpulkan elektron bebas yang terkait dengan pasangan lubang elektron yang dihasilkan cahaya dan kontak sisi belakang mengumpulkan lubang bebas. (Dari Chen 2015.)

**TABEL 3.1**

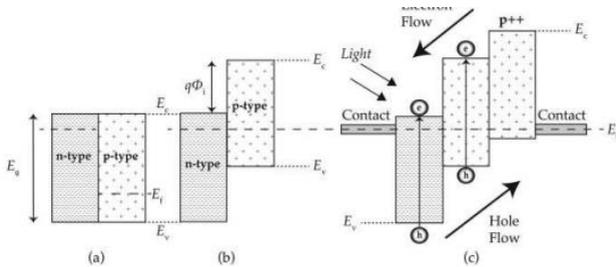
Komposisi Khas Sel PV Silikon Kristal

Lapisan	Bahan Khas	Fungsi
superstrate	Kaca	Transparan; memberikan stabilitas struktural dan perlindungan dari lingkungan
Antirefleksif pelapis (ARC)	Silikon nitrida (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	Meminimalkan pantulan cahaya dari sel PV
Sisi depan kontak	Perak (Ag) atau aluminium (Al)	Mengumpulkan elektron
lapisan tipe-n persimpangan pn	Monokristalin atau silikon polikristalin	Mengangkut elektron
lapisan tipe-p		Menghasilkan pasangan elektron-lubang Mengangkut lubang
Permukaan belakang lapisan lapangan	p <sup>++</sup> yang sangat didoping silikon	Memblokir elektron dari kontak sisi belakang
Sisi belakang kontak	Perak (Ag) atau aluminium (Al)	Mengumpulkan lubang

Sumber: Chen (2015).

Di bawah lapisan aktif tipe-p dan di dekat bagian bawah sel PV ada dua lapisan lagi. Lapisan pertama bertindak sebagai lapisan medan permukaan belakang yang memisahkan bagian belakang sel PV dan mencegah elektron minoritas di lapisan tipe-p mengalir ke bagian bawah sel di mana mereka akan bebas bergabung kembali dengan lubang dan selanjutnya mengurangi efisiensi pengumpulan dan arus listrik keseluruhan. Dan akhirnya, di bawah lapisan bidang permukaan belakang adalah kontak sisi belakang yang terbuat dari aluminium, perak, atau konduktor serupa yang secara energik menguntungkan untuk mengumpulkan lubang yang dihasilkan di lapisan aktif sel (Chen 2015).

Seperti yang dijelaskan dalam Bab 2, elektron dan lubang yang dihasilkan di dalam daerah penipisan di persimpangan lapisan tipe-p dan tipe-n dan dalam satu panjang difusi dari daerah penipisan ini cenderung bergabung kembali dan lebih mungkin mencapai kontak di kedua sisi PV sel. Begitu sampai di kontak, mereka dapat dikumpulkan di sirkuit eksternal ke sel PV sebagai arus dan energi listrik yang berguna. Potensi built-in dari sambungan pn memberikan gaya medan listrik yang kuat untuk menyapu elektron dan lubang ke arah yang berlawanan dan dengan demikian mencegah rekombinasi. Hasil akhir dari proses ini adalah hingga 26% energi cahaya yang masuk (National Renewable Energy Laboratory [NREL] 2019) dapat secara efektif dan efisien diubah menjadi energi listrik



**GAMBAR 3.3**

Struktur pita energi dalam sel PV silikon. (a) pn junction sebelum drift dan difusi elektron dan hole; (b) persimpangan pn pada kesetimbangan dalam kondisi gelap (yaitu, nol cahaya); (c) pn junction terintegrasi ke dalam sel PV di bawah kondisi yang diterangi pada kesetimbangan (yaitu, tidak ada arus sewa). Pada kesetimbangan, tingkat Fermi  $E_f$  datar di semua lapisan dalam struktur sel PV. Dalam perangkat praktis, pita konduksi dan valensi menekuk di dekat antarmuka antara yang berbeda lapisan daripada mengalami perubahan mendadak yang disarankan oleh diagram yang disederhanakan di atas.

sel PV generasi pertama ini adalah dengan melihat sel dari sudut pandang energi dengan menyusun diagram pita energi dari berbagai lapisan yang membentuk sel. Energi lapisan fungsional elektrik dari struktur sel PV di Gambar 3.2 ditampilkan dalam Gambar 3.3. Kesenjangan antara valensi pita dan tepi pita konduksi adalah celah pita energi ( $E_g$ ) silikon dan sekitar 1,14 eV pada suhu kamar. Tingkat energi Fermi ( $E_f$ ) juga ditampilkan untuk semua lapisan dalam struktur PV.  $E_f$  sesuai dengan energi di mana probabilitas menemukan elektron bebas atau lubang pada energi yang lebih rendah tingkat adalah 0,5.  $E_f$  juga mencerminkan keseimbangan elektron bebas dan lubang bebas di a semikonduktor. Dalam semikonduktor intrinsik,  $E_f$  terletak di tengah celah energi, mencerminkan bahwa jumlah elektron bebas dalam konduksi pita hampir sama dengan jumlah lubang bebas di pita valensi. Di lapisan tipe-p, tingkat Fermi ( $E_f$ ) energi terletak dekat dengan pita valensi, mencerminkan fakta bahwa materi

didominasi oleh lubang bebas di valensi pita dan elektron bebas dalam pita konduksi adalah minoritas. Di lapisan tipe-n, situasinya adalah sebaliknya.  $E_f$  terletak dekat dengan pita konduksi, mencerminkan fakta bahwa semikonduktor tipe-n didominasi oleh elektron pada pita konduksi. Dalam logam, pita konduksi dan valensi tumpang tindih dan tingkat Fermi memiliki energi yang sama dengan energi maksimum yang dapat dimiliki elektron dalam logam itu pada suhu nol mutlak. Dalam beberapa semikonduktor yang didoping berat, tingkat Fermi juga dapat terletak di dalam pita valensi atau konduksi.

Ketika lapisan bahan yang berbeda bergabung bersama, keseimbangan tercapai ketika tingkat Fermi sejajar satu sama lain. Ketika tipe-p dan lapisan tipe-n pertama kali bergabung, tingkat energi Fermi berbeda (Gambar 3.3a), tetapi keseimbangan menyebabkan dua tingkat Fermi sejajar (Gambar 3.3b). Untuk memfasilitasi keseimbangan, elektron dari daerah tipe-n yang kaya elektron berdifusi ke daerah tipe-p (dan sebaliknya untuk hole). Sebagai hasil dari difusi, sisi p sambungan menjadi bermuatan negatif dan sisi n sambungan menjadi bermuatan positif. Karena muatan negatif tertarik ke muatan positif, penyimpangan segera melawan difusi dan elektron pada sisi p yang bermuatan negatif dari persimpangan melayang kembali ke sisi-n persimpangan berdasarkan daya tarik ini. Keseimbangan antara drift dan difusi terjadi dalam kesetimbangan pada potensi built-in dari persimpangan pn (ditunjukkan sebagai  $q\phi_i$  di Gambar 3.3b). Potensi built-in adalah fungsi dari bahan dan doping di kedua sisi persimpangan, seperti yang dijelaskan secara rinci di Bab

2. Potensi bawaan ini menciptakan bukit energi di mana elektron di pita konduksi dapat mengalir “menurun” dan lubang di pita valensi dapat “mengambang” ke atas bukit. Nilai dari  $q\phi_i$  dalam sambungan pn silikon bervariasi dari sekitar 0,56 eV dalam perangkat yang didoping ringan (untuk satu atom dopan 100 juta atom silikon) hingga 1,04 eV dalam perangkat yang didoping berat (untuk satu atom dopan per 10.000 atom silikon).

Untuk sisa sel PV, kesetimbangan mensyaratkan bahwa tingkat Fermi berada pada energi yang sama di semua lapisan bahan dari kontak sisi depan ke kontak sisi belakang (Gambar 3.3c). Setelah tingkat Fermi dari kelima lapisan pembawa arus dalam sel PV mencapai energi yang sama, dapat dilihat bahwa seluruh sel PV memfasilitasi aliran elektron "menurun" bukit energi dari permukaan bidang belakang silikon p++ yang didoping berat. lapisan ke kontak sisi depan. Demikian juga, sel PV memfasilitasi mengambanginya lubang energi “naik” dari lapisan tipe-n ke kontak sisi belakang. Saat pembawa yang dihasilkan cahaya mengalir melalui sel PV lengkap, ketinggian bukit energi berkurang dari potensi bawaan awal ( $q\phi_i$ ) ke pita energi datar ketika tegangan rangkaian terbuka sel PV tercapai dibentuk menjadi sel persegi panjang untuk panel komersial. Sel PV silikon monokristalin juga jauh lebih tebal daripada teknologi sel PV lainnya dan keduanya kaku dan rapuh. Untuk sistem sel surya yang dapat dikenakan yang tunduk pada pembengkokan dan pelenturan, sifat fisik ini membuat silikon monokristalin sangat rentan terhadap retak dan kerusakan permanen.

Selain boros dan rapuh, sel PV silikon monokristalin cenderung berkinerja buruk saat terkena naungan, kekotoran, atau penyimpangan lain dalam cakupan cahaya di permukaan panel surya. Faktanya, pada instalasi atap, efek debu dan kotoran lainnya telah terbukti menurunkan kinerja PV monokristalin hingga 50% (Sulaiman dan Hussain 2011). Karena sifatnya yang mobile dan portabel, sistem sel surya yang dapat dipakai lebih sering terkena naungan dan penyimpangan lainnya daripada pemasangan di atap, sehingga memperkuat kewajiban silikon monokristalin ini lebih jauh.

Sistem sel surya yang dapat dipakai memang menawarkan keuntungan bagi sel PV silikon monokristalin. Karena sifatnya, sistem yang dapat dikenakan ini tidak akan melihat suhu operasi setinggi panel surya yang dipanggang di atap di bawah sinar matahari langsung atau suhu operasi sedingin panel surya yang menunggu dengan sabar melalui badai salju. Mengingat bahwa suhu tinggi dan rendah dalam sel PV ini dapat menurunkan kinerja keseluruhan secara signifikan, rentang suhu yang lebih sempit yang dialami oleh perangkat yang dapat dikenakan menghasilkan kinerja yang lebih stabil

Dari semua kelemahan silikon monokristalin untuk digunakan dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, kemungkinan yang paling penting adalah biayanya. Silikon monokristalin adalah yang paling mahal di antara sel surya silikon, sekitar 75 sen per Watt (kapasitas produksi daya) untuk modul stasioner (Energy Informative 2013).

### **3.2 Silikon Polikristalin**

Alternatif biaya yang lebih rendah untuk silikon monokristalin adalah silikon polikristalin. Silikon polikristalin sering digunakan sebagai sinonim untuk silikon multikristalin, meskipun istilah multikristalin cenderung menggambarkan silikon dengan kristal yang jauh lebih besar (dalam orde milimeter). Baik silikon polikristalin dan multikristalin (Gambar 3.1b) kurang teratur daripada silikon monokristalin (Gambar 3.1a). Tapi, silikon polikristalin, seperti silikon monokristalin, dimulai dengan satu biji kristal di mana sisa silikon tumbuh. Tidak seperti silikon monokristalin, benih tidak tertarik ke atas selama proses pertumbuhan, dan silikon yang dihasilkan memiliki tepi dan butiran yang mengarah ke struktur yang lebih tidak teratur meskipun masih kristal. Tepi dan butiran juga mengganggu aliran elektron dan menurunkan efisiensi konversi energi. Sel PV yang terbuat dari silikon polikristalin dibuat dengan sangat cara yang mirip dengan sel PV yang terbuat dari silikon monokristalin (Gambar 3.2) dan memiliki struktur pita energi yang sama (Gambar 3.3) yang mengontrol aliran elektron dan lubang melalui sel.

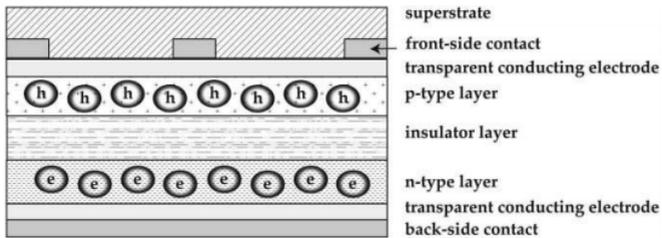
Secara historis, kualitas yang lebih rendah dan struktur silikon polikristalin yang tidak teratur telah menyebabkan sel PV polikristalin tertinggal di belakang silikon monokristalin dalam hal efisiensi. Namun, kemajuan dalam manufaktur untuk sel PV polisilikon telah mengurangi kesenjangan kinerja yang cukup sehingga perbedaan efisiensi sel penelitian terbaik antara kedua jenis sel PV hanya sekitar 4% (NREL 2019).

Setelah dirakit menjadi panel surya yang berfungsi penuh, panel silikon polikristalin memiliki efisiensi antara 13% dan 16%, sedangkan panel surya monokristalin tersedia secara komersial dengan efisiensi antara 15% dan 20% (Energy Informative 2013). Sel PV polisilikon lebih murah untuk diproduksi dan menghasilkan lebih sedikit limbah, yang mengimbangi penurunan efisiensinya. Dalam memilih antara dua jenis sel PV, intinya sering turun ke ruang yang tersedia untuk menempatkan dan memasang panel surya. Jika ruang tidak menjadi masalah, biaya sel surya polisilikon dan sistem yang lebih rendah menjadikannya pilihan yang lebih baik. Jika ruang berada pada harga premium, silikon monokristalin sering menang, meskipun biayanya meningkat.

### **3.3 Silikon Amorf**

Bentuk kristal silikon, termasuk monokristalin, polikristalin, dan multikristalin, bersama-sama membentuk generasi pertama sel surya. Silikon amorf adalah bentuk silikon nonkristalin yang tidak teratur (Gambar 3.1c) yang secara teknis dianggap sebagai anggota sel surya generasi kedua. Karena mereka masih dibuat dari silikon sebagai bahan aktif yang mendasari, bagaimanapun, sel PV silikon amorf dibahas di sini. Meskipun terdapat kelainan pada struktur dasarnya, silikon amorf dapat dibuat menjadi sel PV yang berguna. Gambar 3.4) menggunakan struktur dan komposisi yang sama (Tabel 3.2) sebagai sel PV kristal.

Sama seperti sel PV silikon kristal, sel PV silikon amorf ditutupi dengan superstrate yang biasanya terbuat dari kaca untuk memberikan stabilitas struktural dan melindungi sel PV dari lingkungan sekitar. Tepat di bawah kaca adalah kontak sisi depan yang mengumpulkan lubang yang dihasilkan oleh cahaya yang datang. Lapisan berikutnya adalah elektroda konduktor transparan antireflektif yang sering dibuat dari oksida timah yang didoping-fluorin yang memberikan kontak resistansi rendah antara lapisan aktif sel PV dan kontak sisi depan dan juga mengurangi rekombinasi permukaan lubang bebas. Di bawah elektroda adalah area aktif sel, yang terdiri dari lapisan silikon tipe-p, lapisan isolasi, dan lapisan silikon tipe-n, semuanya terbuat dari silikon amorf terhidrogenasi. Tidak seperti sel PV silikon kristal, lapisan tipe-p dan tipe-n sangat tipis, dan karena itu mereka memiliki kapasitas terbatas untuk menghasilkan pasangan elektron-lubang dalam menanggapi cahaya yang masuk. Lapisan isolator memberikan volume yang lebih besar di mana cahaya dapat menghasilkan pasangan elektron-lubang ini dengan rekombinasi minimal, sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi dari keseluruhan struktur. Selain lapisan isolator ini yang meningkatkan jumlah pasangan elektron-lubang yang dihasilkan dari cahaya yang masuk, struktur sambungan pn berfungsi dengan cara yang sama seperti untuk sel PV kristal.



**GAMBAR 3.4**

Struktur sel PV amorf. Sel PV amorf sering dibalik dari struktur PV silikon dengan lapisan tipe-p lebih dekat ke permukaan sel. Sel PV amorf juga dibuat dengan sambungan pin daripada sambungan pn di mana "i" mengacu pada isolator. Lapisan isolator antara lapisan tipe-p dan tipe-n meningkatkan jumlah pasangan lubang elektron yang dihasilkan oleh cahaya yang masuk untuk keuntungan efisiensi keseluruhan sel PV. Elektroda penghantar transparan digunakan sebagai resistansi rendah, kontak transparan antara kontak sisi depan dan lapisan tipe-p dan lagi, antara kontak sisi belakang dan lapisan tipe-n. Kedua elektroda mengalami degenerasi—didoping sangat berat sehingga bertindak seperti logam. Kedua elektroda juga memiliki celah pita yang besar sehingga sebagian besar transparan terhadap cahaya yang masuk. (DariQarony dkk. 2017.)

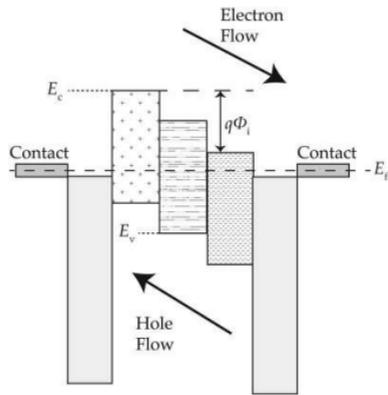
**TABEL 3.2**

Komposisi Khas Sel PV Silikon Amorf

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Transparan; memberikan stabilitas struktural dan perlindungan dari lingkungan
Kontak sisi depan	Perak	Mengumpulkan lubang
Transparan elektroda konduktor	Didoping fluor oksida timah (FTO)	Lapisan antireflektif (ARC); kontak resistansi rendah ke lapisan yang berdekatan
lapisan tipe-p	a-SiC:H	Mengangkut lubang
lapisan isolator <sup>inert</sup>	a-Si: H	Menghasilkan pasangan elektron-lubang
lapisan tipe-n <sup>inert</sup>	a-Si: H	Mengangkut elektron
Transparan elektroda konduktor	Aluminium-doped seng oksida (AZO)	Memblokir elektron dalam kontak sisi belakang agar tidak memasuki sel PV
Kontak sisi belakang	Perak (Ag)	Mengumpulkan elektron

Sumber: Karoni dkk. (2017).

<sup>inert</sup> Silikon amorf terhidrogenasi digunakan dalam lapisan ini karena kepadatan cacatnya yang rendah.



**GAMBAR 3.5**

Struktur pita energi sel PV amorf. Dalam struktur sel PV amorf yang ditunjukkan pada Gambar 3.4, elektron mengalir ke sisi belakang sel (ke kanan pada gambar di atas) dan lubang mengumpul ke arah atas sel (ke kiri). Elektroda konduktor transparan yang didoping berat bertindak seperti logam, memberikan kontak resistansi rendah untuk lubang di lapisan tipe-p agar berhasil melakukan perjalanan ke kontak sisi depan untuk pengumpulan. Elektroda konduktor transparan di dekat bagian bawah sel bertindak dengan cara yang sama untuk mempromosikan pengangkutan elektron ke kontak sisi belakang.

Sel PV silikon amorf ditunjukkan pada: Gambar 3.4 terbalik (yaitu, lapisan berada dalam urutan yang berlawanan dari depan ke belakang sel) dari sel PV silikon kristal (Gambar 3.2). Akibatnya, dalam hal energi (Gambar 3.5), elektron yang dihasilkan cahaya mengalir menuruni bukit energi menuju bagian belakang sel, sementara lubang melayang ke atas bukit energi menuju bagian depan sel. Elektroda konduksi transparan di bagian depan dan belakang sel PV didoping sedemikian rupa sehingga tingkat Fermi berada di atas tepi pita konduksi untuk memfasilitasi aliran elektron dan lubang yang tepat untuk efisiensi konversi energi terbaik.

Sebagian besar silikon amorf dihidrogenasi ( $\alpha$ -Si:H) untuk digunakan dalam sel PV dan meskipun tidak memiliki celah pita energi formal, ia memiliki celah mobilitas yang nilainya berkisar antara 1,7 dan 1,9 eV dan melakukan fungsi yang kurang lebih sama dengan celah pita energi dalam struktur silikon kristal. . Karena ikatan yang menjuntai dan ketidakteraturan lainnya serta cacat pada struktur amorf yang tidak teratur, silikon amorf memiliki mobilitas lubang yang jauh lebih rendah daripada silikon kristal. Sementara mobilitas lubang di silikon kristal sering berakhir 100  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  (El-Cat nd), mobilitas lubang silikon amorf berada pada orde 0,01  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{detik}$  (Schiff 2006). Mobilitas lubang yang buruk secara inheren merupakan kontributor utama pengurangan efisiensi sel PV silikon amorf yang hanya mencapai sekitar 14% (NREL 2019). Karena efisiensi yang rendah ini, silikon amorf secara historis hanya digunakan untuk perangkat bertenaga surya berdaya rendah seperti kalkulator. Namun, fakta bahwa silikon amorf dapat dibuat menjadi sel PV yang sangat tipis secara drastis mengurangi biayanya dan memungkinkannya untuk disesuaikan dengan topologi yang tidak teratur karena fleksibilitas dan kelenturannya. Silikon amorf juga tidak tumbuh dari biji seperti silikon kristal, tetapi dapat disimpan pada suhu yang sangat rendah dan di area yang luas, sehingga memungkinkan pengendapan ke plastik, fabrikasi menjadi sel PV individu yang besar, pengurangan limbah, dan integrasi ke dalam roll-to-roll yang murah. teknik pembuatan gulungan. Semua keuntungan ini berkontribusi pada pengurangan sel PV dan biaya panel surya secara dramatis dibandingkan dengan

silikon kristal. Lebih lanjut, sel PV film tipis seperti yang dibuat dengan silikon amorf memiliki arus yang lebih sedikit dan berkinerja jauh lebih baik pada kondisi cahaya rendah daripada sel PV yang lebih tebal berdasarkan silikon kristal. Keuntungan ini dapat mengatasi kerugian dari pengurangan efisiensi dan pengurangan masa pakai untuk berbagai aplikasi termasuk sistem sel surya yang dapat dipakai.

### **3.4 Ringkasan**

Sejauh ini, silikon adalah pilihan paling populer untuk sel PV komersial dan panel surya. Dengan efisiensi tinggi (>25%) dan teknologi fabrikasi yang matang, silikon kristal siap untuk mendukung instalasi surya stasioner dan tujuan umum untuk tahun-tahun mendatang. Untuk sistem sel surya yang dapat dipakai di mana struktur kaku dapat ditoleransi, silikon kristalin juga merupakan pilihan yang baik. Ketika fleksibilitas sangat penting, sel PV dengan efisiensi rendah dan biaya lebih rendah yang dibuat dengan silikon amorf dapat dililitkan di hampir semua hal termasuk pakaian pintar dan sejumlah besar aksesoris yang dikenakan pada tubuh manusia. Ketika mempertimbangkan semua jenis sel PV silikon bersama-sama, mungkin sulit untuk percaya bahwa ada aplikasi untuk sel surya yang membutuhkan sesuatu di luar silikon. Tapi, sel surya generasi kedua dan ketiga berusaha untuk menceritakan kisah sebaliknya.

## Referensi

Chen, Jiahe. 2015. "Recent Developments on Silicon Based Solar Cell Technologies and Their Industrial Applications." Energy Efficiency Improvements in Smart Grid Components. <https://doi.org/10.5772/59171>.

Dai Pra, Lea Beatriz, Joao Batista Dias, and Amanda Goncalves Kieling. 2015. "Comparison between the Energy Required for Production." Journal of Energy and Power Engineering 9: 592–597. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2015.06.011>.

El-Cat. n.d. "Properties of Silicon." Accessed May 11, 2019. <https://www.el-cat.com/silicon-properties.htm>.

Energy Informative. 2013. "Solar Cell Comparison Chart – Mono-, Polycrystalline and Thin Film." <https://energyinformative.org/solar-cell-comparison-chartmono-polycrystalline-thin-film/>.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2019. "Best Research-Cell Efficiency." <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

Qarony, Wayesh, Mohammad I. Hossain, M. Khalid Hossain, M. Jalal Uddin, A. Haque, A. R. Saad, and Yuen Hong Tsang. 2017. "Efficient Amorphous Silicon Solar Cells: Characterization, Optimization, and Optical Loss Analysis." *Results in Physics* 7: 4287–4293

Schiff, Eric A. 2006. "Hole Mobilities and the Physics of Amorphous Silicon Solar Cells." *Journal of Non-Crystalline Solids* 352 (9–20): 1087–1092.

Sulaiman, Shaharin A., and Haizatul H. Hussain. 2011. "Effects of Dust on the Performance of PV Panels." *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 5 (10): 6.

Sulaiman, Shaharin A., and Haizatul H. Hussain. 2011. "Effects of Dust on the Performance of PV Panels." *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 5 (10): 6.

U.S. Department of Energy (DOE). n.d. "History of Solar." [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)

## BAB 4 SEL SURYA GENERASI KEDUA

---

Fotovoltaik generasi kedua (PV) mengacu pada silikon nonkristalin atau semikonduktor anorganik non-silikon yang dibuat dalam struktur yang mirip dengan sel PV silikon kristal, meskipun dalam film yang jauh lebih tipis. Pada hampir 7% pangsa pasar global (Solar Central nd), sel PV ini menguasai sebagian besar pangsa pasar global panel surya yang tersisa. Tiga bahan yang paling menjanjikan dari opsi generasi kedua yang dibahas dalam bab ini adalah galium arsenida (GaAs), kadmium tellurida (CdTe), dan tembaga indium galium selenida (CIGS). Bahan generasi kedua lainnya, silikon amorf, juga dapat bersaing dengan sel surya generasi pertama dan dibahas dalam bagian 3 dengan sel surya berbasis silikon lainnya.

### 4.1 Galium Arsenida

Seperti silikon, gallium arsenide (GaAs) adalah semikonduktor anorganik yang dapat dibuat menjadi sel PV dengan menggabungkan lapisan GaAs yang didoping tipe-p (akseptor) dengan lapisan GaAs yang didoping tipe-n (donor). Struktur sel PV GaAs (Gambar 4.1, Tabel 4.1) sangat mirip dengan struktur sel PV silicon.

Struktur pita energi sel PV GaAs juga mirip dengan sel PV silikon kristalin yang sesuai (Gambar 3.3) kecuali bahwa GaAs memiliki celah pita yang lebih lebar daripada silikon (1,43 eV) dan selanjutnya, potensi internal yang lebih besar, yang mengarah ke tegangan rangkaian terbuka yang lebih besar di sel PV.

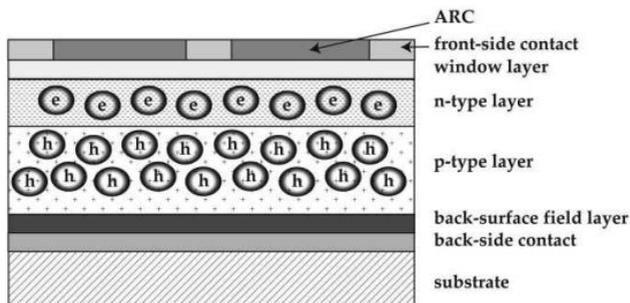
Beberapa teknologi GaAs modern menghilangkan lapisan substrat untuk meningkatkan fleksibilitas sel surya dan mengurangi biaya (Alta Devices nd). Selanjutnya, GaAs dan struktur film tipis lainnya sering menggunakan lapisan jendela di dekat permukaan sel PV. Karena sejumlah besar foton cahaya diserap di dekat permukaan sel, lapisan jendela mencegah pasangan elektron-hole yang dihasilkan dari penyerapan foton mencapai permukaan sel di mana kemungkinan rekombinasi dan kehilangan berikutnya energi listriknya tinggi. Lapisan jendela biasanya terdiri dari satu atau lebih oksida logam transparan yang memiliki celah pita besar yang berfungsi untuk mencegah elektron dan lubang bermigrasi ke permukaan sel PV.

Sementara sel PV GaAs beroperasi sangat mirip dengan sel PV berbasis silikon, ada beberapa perbedaan utama antara kedua bahan tersebut. Celah pita yang lebih besar dari GaAs berarti bahwa panjang gelombang terpanjang di mana GaAs merespon lebih pendek dari pada silikon, dan oleh karena itu GaAs kurang merespon terhadap cahaya inframerah. Saat merespons sinar matahari, perbedaan celah pita ini berarti bahwa GaAs memiliki efisiensi maksimum atau ultimit yang

sedikit lebih rendah daripada silikon (Belghachi 2015). Dan, GaAs juga merupakan semikonduktor celah pita langsung, sedangkan silikon adalah bahan celah pita tidak langsung. Celah pita tidak langsung berarti bahwa elektron bergerak dari tingkat energi tertinggi dalam pita valensi ( $E_v$ ) ke tingkat energi terendah di pita konduksi ( $E_c$ ), elektron harus mengalami baik perubahan energi maupun perubahan momentum. Sebaliknya, semikonduktor celah pita langsung hanya membutuhkan elektron mengalami perubahan energi untuk berpindah dari  $E_v$  untuk  $E_c$  dan sebaliknya dari  $E_c$  untuk  $E_v$ . Celah pita langsung berarti bahwa GaAs memiliki panjang difusi (pembawa minoritas) yang lebih pendek daripada silikon dan sebagai hasilnya, elektron bergerak jauh jarak yang lebih pendek sebelum bergabung kembali. Namun, GaAs juga memiliki karakteristik penyerapan yang lebih kuat daripada silikon, sehingga memungkinkan perangkat yang jauh lebih tipis untuk menyerap jumlah total cahaya yang sama dengan sel PV berbasis silikon yang setara. Efek bersih dari perbedaan antara GaAs dan sel PV berbasis silikon adalah bahwa efisiensi sel penelitian yang ditunjukkan untuk GaAs setinggi 29,1%, sementara silikon monokristalin jauh lebih pendek dari efisiensi utamanya pada 26,1% (Laboratorium Energi Terbarukan Nasional [NREL] 2019).

Karena GaAs menyerap lebih banyak cahaya daripada silikon, ia dapat dibuat menjadi film yang cukup tipis agar fleksibel, tidak mudah retak atau pecah, dan cocok untuk sistem sel surya yang dapat dipakai. Tidak seperti silikon, GaAs juga menunjukkan kinerja cahaya rendah yang baik dan mampu

menghasilkan energi listrik yang berguna bahkan di lingkungan yang menyala secara artifisial di mana sistem sel surya yang dapat dipakai akan sering terpapar. Kinerja cahaya rendah yang luar biasa muncul sebagai akibat dari arus bocor yang lebih rendah di GaAs yang mengurangi kehilangan daya dan menstabilkan efisiensi konversi energi pada tingkat cahaya yang lebih rendah. Performa cahaya rendah dan fleksibilitas sel adalah keuntungan utama untuk sel PV GaAs dibandingkan dengan sel PV silikon generasi pertama, terutama dalam sistem sel surya yang dapat dipakai.



**GAMBAR 4.1**

Gallium arsenide (GaAs) struktur sel PV. Struktur sel PV GaAs mirip dengan sel PV silikon kristal kecuali untuk penambahan lapisan jendela di dekat bagian atas sel. Lapisan jendela mencegah pasangan elektron-lubang bergabung kembali di permukaan. Ini sangat penting untuk semikonduktor celah pita langsung seperti GaAs karena sejumlah besar foton diserap di dekat permukaan sel PV. Di bagian bawah sel, silikon dapat digunakan sebagai substrat untuk stabilitas struktural untuk mengurangi biaya sel PV. (Dari Xiao dkk. 2018.)

Meskipun kurang relevan dengan sistem sel surya yang dapat dipakai yang lebih mungkin daripada sistem tradisional untuk dioperasikan di lingkungan terlindung, GaAs tahan terhadap sinar ultraviolet, kerusakan kelembaban, dan penurunan

kinerja pada suhu tinggi. Kekokohan ini membuat sel PV yang dibuat dengan GaAs sangat cocok untuk aplikasi luar angkasa dan luar angkasa, baik berawak atau tak berawak, dapat dipakai atau tidak, jangka panjang atau sementara.

**TABEL 4.1**  
Komposisi Khas Sel PV GaAs

Lapisan	Bahan Khas	Fungsi
Kontak sisi depan	Ni/Au/Ge/Ni/Au	Mengumpulkan elektron
Lapisan antireflektif (ARC)	Silikon nitrida (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	Meminimalkan pantulan cahaya dari sel PV
Lapisan jendela	indium gallium tipe-n fosfida (InGaP)	Mengurangi rekombinasi
lapisan tipe-n	Gallium arsenida (GaAs)	Mengangkut elektron
lapisan tipe-p		Menghasilkan pasangan elektron-lubang Mengangkut lubang
Lapisan bidang permukaan belakang	indium gallium tipe-p fosfida (InGaP)	Memblokir elektron dari kontak sisi belakang
Kontak sisi belakang	Platinum/emas (Pt/Au)	Mengumpulkan lubang
Substrat	Silikon (Si)	Memberikan stabilitas struktural

Sumber: Xiao dkk. (2018).

Sayangnya, di semua aplikasi kecuali yang paling berkinerja tinggi, banyak manfaat sel PV GaAs ini secara historis dibayangi oleh biayanya yang tinggi. Biaya telah membatasi sel PV ini untuk aplikasi di mana biaya yang lebih tinggi dapat ditoleransi untuk kinerja dan daya yang disediakan oleh teknologi PV GaAs. Namun, baru-baru ini, kemajuan dalam pembuatan sel PV GaAs telah membuat film tipis satu mikron yang semakin layak secara komersial (Wilkins 2018). Geometri kecil seperti itu memiliki dampak besar dalam mengurangi biaya keseluruhan dan memungkinkan modul surya yang sangat ringan yang mungkin menarik untuk atap tradisional dan instalasi stasioner lainnya. Peningkatan fleksibilitas dan pengurangan berat juga menarik untuk sistem yang dapat

dipakai, meskipun keberadaan arsenik dalam sel PV GaAs dapat membatasi penggunaannya dalam sistem pemanenan energi yang dapat dipakai.

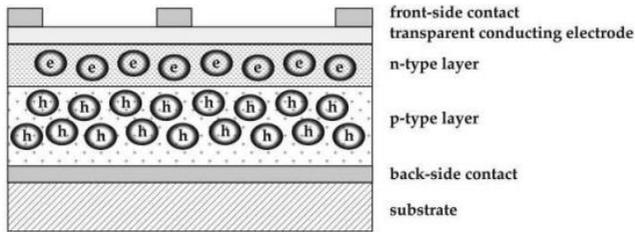
#### **4.2 Kadmium Telluride**

Seperti GaAs, CdTe juga merupakan semikonduktor celah pita langsung yang memungkinkannya menyerap lebih banyak cahaya dalam film yang lebih tipis daripada silikon, sesuai dengan hukum Beer (Persamaan 2.5). Pada panjang gelombang 360 nm, silikon, GaAs, dan CdTe semuanya memiliki koefisien absorpsi ( $\alpha$ ) pada pesanan  $10^6 \text{ cm}^{-1}$ , yang berarti bahwa mereka semua menyerap cahaya ungu dalam jumlah yang sama untuk ketebalan film tertentu. Dengan 560 nm (lampu hijau), silikon telah kehilangan dua kali lipat dalam koefisien penyerapan ( $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ), sedangkan CdTe dan GaAs hanya kehilangan satu orde besarnya ( $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). Dan, pada 800 nm, kesenjangan penyerapan semakin melebar (PV Education 2019). Karena spektrum sinar matahari serta banyak sumber cahaya buatan mengandung persentase energi yang signifikan dalam panjang gelombang hijau dan lebih panjang, perbedaan dalam koefisien penyerapan ini menghasilkan penyerapan cahaya yang jauh lebih sedikit untuk geometri yang sama dalam silikon dibandingkan dengan CdTe dan GaAs. Namun, tidak seperti GaAs, biaya untuk tata surya CdTe sebanding dengan tata surya silikon kristal, sehingga memberikan banyak peluang bagi CdTe untuk masuk ke pasar energi surya. Pada tahun 2017, CdTe lebih berhasil

daripada teknologi PV lainnya dalam hal head-to-head dengan silikon, menangkap 2,4% energi global yang dihasilkan dari sistem energi surya berbasis PV (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems 2019).

Sel PV ACdTe memiliki struktur yang mirip dengan semua sel PV berbasis semikonduktor lainnya (Gambar 4.2, Tabel 4.2) kecuali bahwa sambungan pn bersifat heterogen (terbuat dari dua bahan yang berbeda) daripada homogen.

Lapisan aktif (penyerap cahaya) sel CdTe PV terdiri dari lapisan tipis ntype kadmium sulfida (CdS) yang kira-kira 0,2  $\mu\text{m}$  tebal dan lapisan CdTe tipe-p jauh lebih tebal. Seperti yang berbasis semikonduktor bilayer junction lainnya, lapisan tipe-n mengangkut elektron dan lapisan tipe-p mengangkut lubang yang dihasilkan oleh cahaya yang menyinari sambungan pn. Di atas lapisan tipe-n adalah elektroda konduktor transparan yang bekerja dalam kombinasi dengan lapisan CdS untuk mengurangi rekombinasi dan meningkatkan efisiensi pengumpulan. Elektroda konduktif transparan ini juga bertindak (a) sebagai lapisan antireflektif; (b) untuk mengumpulkan elektron; dan (c) untuk mentransmisikan cahaya ke struktur pn di bawahnya. Kontak listrik ke elektroda konduktor transparan dilakukan melalui lapisan kontak sisi depan berpola dari logam yang hanya menutupi sebagian kecil permukaan sel PV.



**GAMBAR 4.2**

Struktur sel PV kadmium telluride (CdTe). Elektroda konduktor transparan bertindak sebagai antarmuka resistansi rendah antara lapisan tipe-n dan kontak sisi depan untuk memungkinkan pengumpulan elektron bebas yang lebih efisien yang dihasilkan oleh penyerapan foton. Lubang bebas dikumpulkan di sisi belakang sel. (Dari Abdullah, Razooqi, dan Al-Ajili 2013.)

**TABEL 4.2**

Komposisi Khas Sel PV CdTe

Lapisan	Bahan	Fungsi
Kontak sisi depan	Aluminium (Al)	Mengumpulkan elektron
Konduksi transparan elektroda	Timah oksida (SnO <sub>2</sub> )	Lapisan anti pantu; kontak resistansi rendah ke lapisan yang berdekatan
lapisan tipe-n	Kadmium sulfida (CdS)	Mengangkut elektron dan bertindak sebagai lapisan jendela
lapisan tipe-p	CdTe	Mengangkut lubang
Kontak sisi belakang	Emas (Au)	Mengumpulkan lubang
Substrat	Kaca	Memberikan stabilitas struktural

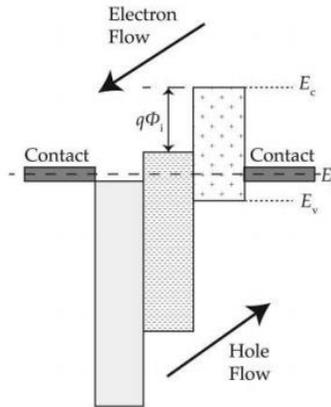
Sumber: Abdullah, Razooqi, dan Al-Ajili (2013).

Di sisi belakang sel PV, kontak sisi belakang mengumpulkan lubang bebas yang diangkat melalui sisi-p dari sambungan pn aktif dan seluruh sel duduk di atas substrat seperti kaca yang memberikan stabilitas struktural (Abdullah, Razooqi, dan Al-Ajili 2013).

Struktur pita energi sel PV CdTe (Gambar 4.3) berbeda dari sel PV silikon dan GaAs karena area aktifnya merupakan heterojungsi yang terdiri dari dua bahan semikonduktor yang

berbeda (CdTe dan CdS). Celah pita CdS sekitar 2,4 eV, jauh lebih lebar dari silikon, GaAs, dan CdTe, sedangkan celah pita CdTe lebih dekat dengan GaAs pada 1,5 eV. Seperti GaAs dan silikon, celah pita CdTe sangat cocok dengan sinar matahari, sementara CdS memiliki celah pita yang jauh lebih lebar dan berhenti menyerap cahaya pada panjang gelombang yang jauh lebih pendek daripada semikonduktor lainnya.

Karena celah pita langsungnya, sel CdTe PV memiliki karakteristik penyerapan cahaya yang sangat baik dan sangat cocok untuk film tipis. Efisiensi sel penelitian film tipis CdTe telah mencapai 22,1% (NREL 2019), sedangkan efisiensi sistem modul surya mencapai 16,1% (Rix et al. 2015). Dikombinasikan dengan biaya rendah, karakteristik ini membuat CdTe menjadi pilihan populer untuk panel surya konvensional, peringkat kedua di belakang silikon kristal. Dan, seperti teknologi film tipis lainnya, sel PV CdTe fleksibel dan sangat cocok untuk topologi sistem sel surya yang tidak teratur dan berubah-ubah.



**GAMBAR 4.3**

Struktur pita energi sel PV CdTe. Struktur pita energi sesuai dengan struktur fisik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dalam istilah energi, elektron mengalir menuruni bukit energi menuju sisi depan sel (ke kiri pada gambar di atas) dan lubang melayang menaiki bukit energi menuju bagian belakang sel. Pada kesetimbangan, tingkat Fermi sejajar dan pita konduksi dan valensi menekuk pada antarmuka (tidak ditampilkan). Elektroda konduktor transparan di bagian atas sel didoping berat dan bertindak sebagai kontak resistansi rendah antara lapisan tipe-n dan kontak sisi depan.

Film CdTe bersaing dengan baik dengan film tipis silikon amorf dan sel PV kristal konvensional dan dapat dibuat dengan biaya yang sebanding atau lebih rendah daripada sel PV silikon monokristalin (Horowitz et al. 2017). CdTe juga lebih stabil pada suhu operasi yang lebih tinggi daripada sepupu silikonnya. CdTe memiliki manfaat tambahan berupa pengurangan dampak lingkungan selama pembuatan karena sel PV ini menggunakan lebih sedikit air dan menghasilkan lebih sedikit gas rumah kaca daripada banyak teknologi sel PV lainnya. Namun, telurium adalah elemen yang sangat langka yang diekstraksi dari proses pemurnian tembaga dan

membutuhkan sejumlah besar tembaga untuk menghasilkan sejumlah kecil telurium. Untuk alasan ini saja, sistem sel surya yang dibuat dengan CdTe kemungkinan tidak akan berkelanjutan dalam jangka panjang. Masalah rumit lebih lanjut, kadmium adalah logam berat beracun dengan dampak serius pada ginjal manusia dan sistem pernapasan, reproduksi, dan kerangka (Godt et al. 2006). Toksisitas kadmium memiliki implikasi lingkungan dan kesehatan masyarakat yang serius pada akhir siklus hidup panel surya tradisional dari CdTe. Pembuangan panel CdTe dengan hati-hati dan tepat sangat penting, tetapi dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, ada juga potensi paparan kadmium selama penggunaan sel PV CdTe. Dengan demikian, risiko terhadap kesehatan masyarakat mungkin terlalu tinggi bagi CdTe untuk bertahan di pasar perangkat wearable. Pembuangan panel CdTe dengan hati-hati dan tepat sangat penting, tetapi dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, ada juga potensi paparan kadmium selama penggunaan sel PV CdTe. Dengan demikian, risiko terhadap kesehatan masyarakat mungkin terlalu tinggi bagi CdTe untuk bertahan di pasar perangkat wearable.

### **4.3 Tembaga Indium Gallium Selenide**

Mengurangi kadmium dan menghilangkan telurium adalah pendekatan strategis untuk menghindari dampak negatif yang signifikan terhadap sumber daya alam, lingkungan, dan kesehatan masyarakat yang terkait dengan sistem CdTe. CIGS memenuhi tagihan. Film tipis CIGS adalah yang terakhir dari empat pemain utama (silikon amorf, GaAs, CdTe, dan CIGS) di antara sel PV anorganik generasi kedua. Efisiensi sel penelitian terbaik dari sel CIGS dapat bersaing dengan teknologi sel surya generasi pertama dan kedua lainnya, sebesar 23,4%, dibandingkan dengan 22,1% untuk CdTe dan 26,1% untuk sel PV berbasis silikon kristal (NREL 2019). Struktur fisik sel CIGS PV sangat mirip dengan sel CdTe (Gambar 4.2) seperti struktur pita energi (Gambar 4.3). Komposisi sel CIGS yang khas dijelaskan dalam Tabel 4.3.

Seperti CdTe dan GaAs, sel CIGS PV dibuat dari semikonduktor celah pita langsung yang memungkinkan penyerapan cahaya lebih besar dan selanjutnya, perangkat yang jauh lebih tipis secara keseluruhan. Manfaat tambahan dari film CIGS adalah bahwa celah pita energi dari lapisan CIGS dapat disesuaikan atau disetel ke nilai antara 1 dan 2,4 eV dengan mengubah rasio elemen CIGS (tembaga, indium, galium, selenium) untuk memaksimalkan penyerapan cahaya (Polman et al. 2016). Pada celah pita yang lebih rendah, film tipis CIGS memiliki efisiensi sel penelitian tertinggi di antara film tipis sebesar 22,9% (NREL 2019), tetapi kesulitan dalam transisi dari fabrikasi yang berhasil di laboratorium ke produksi massal

telah menjaga efisiensi solar CIGS kecil dan besar. modul di bawah 20% (Powalla et al. 2017). Sementara CIGS masih menggunakan lapisan yang mengandung kadmium (yaitu, lapisan CdS tipe-n), lapisan ini jauh lebih tipis daripada lapisan CdTe tipe-p dalam sel PV CdTe. Sebagai hasilnya, jumlah total kadmium yang digunakan dalam sel-sel ini sangat berkurang seperti halnya risiko terhadap kesehatan manusia selama penggunaan dan kesehatan ekosistem selama pembuangan dan daur ulang. Fakta bahwa sel CIGS tidak menggunakan telurium elemen tanah jarang adalah kemenangan lain dalam kolom lingkungan untuk CIGS atas CdTe. Serupa dengan CdTe, kinerja sel CIGS juga stabil dengan peningkatan suhu, tidak seperti sel surya berbasis silikon. Meskipun perubahan suhu di antara sistem sel surya yang dapat dipakai cenderung lebih kecil daripada yang dialami oleh instalasi surya luar ruangan, stabilitas suhu tetap merupakan karakteristik yang diinginkan untuk mempertahankan output daya yang konsisten dan dapat diprediksi.

**TABEL 4.3**

Komposisi Khas dari Sel PV CIGS

Lapisan	Bahan	Fungsi
Lapisan jendela	Aluminium seng oksida (AZO)	Transparan; mengurangi rekombinasi dan kerugian saat ini
Konduksi transparan elektroda	Seng oksida (ZnO)	Antireflektif; Mengumpulkan elektron
lapisan tipe-n	kadmium sulfida (CdS) tipe-n	Mengangkut elektron
lapisan tipe-p	indium tembaga tipe-p galium selenida (CIGS)	Mengangkut lubang
Kontak sisi belakang	Molibdenum (Mo)	Mengumpulkan lubang; memantulkan cahaya kembali ke CIGS
Substrat	Gelas soda kapur, kertas timah, atau plastik	Meningkatkan tegangan rangkaian terbuka sel; memberikan stabilitas struktural

Sumber: NREL (nd) dan Parisi et al. (2015).

#### 4.4 Ringkasan

Sementara silikon tetap menjadi pilihan paling populer untuk sel PV komersial dan panel surya, film tipis generasi kedua dapat bersaing dalam hal efisiensi di mana sinar matahari diubah menjadi listrik yang dapat digunakan. Dengan efisiensi sel penelitian yang tinggi (masing-masing 29%, 22%, dan 23% untuk GaAs, CdTe, dan CIGS), sel surya non-silikon generasi kedua menawarkan kinerja yang sebanding dengan silikon dengan manfaat tambahan. Namun, terlepas dari kinerja yang kompetitif, teknologi film tipis berjuang untuk meningkatkan pangsa pasar panel surya dan modul tradisional sebagian besar karena kematangan dan inersia teknologi sel surya silikon. Namun, dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, di mana fleksibilitas dan kinerja cahaya rendah sama pentingnya

dengan efisiensi, sel PV semikonduktor anorganik film tipis sangat menarik.

## Referensi

Abdullah, Rasha A., A. Razooqi Mohammed, and Al-Ajili Adwan N. H. 2013. "Characterization of the Energy Band Diagram of Fabricated SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe Solar Cells." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 79: 118–122.

Alta Devices. n.d. "World's Most Efficient, Thin and Flexible Solar Technology." Alta Devices (blog). Accessed May 22, 2019. <https://www.altadevices.com/technology/>.

Belghachi, Abderrahmane. 2015. "Theoretical Calculation of the Efficiency Limit for Solar Cells." In *Solar Cells - New Approaches and Reviews*, edited by Leonid A. Kosyachenko. InTech. <https://doi.org/10.5772/58914>.

Bomhard, Ernst M., Heinz-Peter Gelbke, Hermann Schenk, Gary M. Williams, and Samuel M. Cohen. 2013. "Evaluation of the Carcinogenicity of Gallium Arsenide." *Critical Reviews in Toxicology* 43 (5): 436–466. <https://doi.org/10.3109/10408444.2013.792329>

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. 2019. "Photovoltaics Report." <https://>

[www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf).

Godt, Johannes, Franziska Scheidig, Christian Grosse-Siestrup, Vera Esche, Paul Brandenburg, Andrea Reich, and David A. Groneberg. 2006. "The Toxicity of Cadmium and Resulting Hazards for Human Health." *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* (London, England) 1 (September): 22. <https://doi.org/10.1186/1745-6673-1-22>.

Horowitz, Kelsey A. W., Ran Fu, Tim Silverman, Mike Woodhouse, Xingshu Sun, and Mohammed A. Alam. 2017. "An Analysis of the Cost and Performance of Photovoltaic Systems as a Function of Module Area." NREL/TP-6A20-67006, 1351153. <https://doi.org/10.2172/1351153>.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2019. "Best Research-Cell Efficiency." <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). n.d. "Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells | Photovoltaic Research | NREL." Accessed May 24, 2019.

<https://www.nrel.gov/pv/copper-indium-gallium-diselenide-solar-cells>. Html

Parisi, Antonino, Riccardo Pernice, Vincenzo Rocca, Luciano Curcio, Salvatore Stivala, Alfonso C. Cino, Giovanni Cipriani, Vincenzo Di Dio, Giuseppe Ricco Galluzzo, and Rosario Miceli. 2015. "Graded Carrier Concentration Absorber Profile for High Efficiency CIGS Solar Cells." *International Journal of Photoenergy*. <https://doi.org/10.1155/2015/410549>.

Polman, Albert, Mark Knight, Erik C. Garnett, Bruno Ehrler, and Wim C. Sinke. 2016. "Photovoltaic Materials: Present Efficiencies and Future Challenges." *Science* 352 (6283). <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>.

Powalla, Michael, Stefan Paetel, Dimitrios Hariskos, Roland Wuerz, Friedrich Kessler, Peter Lechner, Wiltraud Wischmann, and Theresa Magorian Friedlmeier. 2017. "Advances in Cost-Efficient Thin-Film Photovoltaics Based on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>." *Engineering* 3 (4): 445–451. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.015>.

PV Education. 2019. "Absorption Coefficient | PVEducation." 2019. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient>.

Ratnaik, R. N. 2003. "Acute and Chronic Arsenic Toxicity." *Postgraduate Medical Journal* 79 (933): 391–396. <https://doi.org/10.1136/pmj.79.933.391>.

Rix, A. J., J. D. T. Steyl, J. Rudman, U. Terblanche, and J. L. van Niekerk. 2015. "First Solar's CdTe Module Technology – Performance, Life Cycle, Health and Safety Impact Assessment." Center for Renewable and Sustainable Energy Studies. [http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/CRSES2015\\_06\\_First-Solar-CdTe-ModuleTechnology-Review-FINAL.ashx](http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/CRSES2015_06_First-Solar-CdTe-ModuleTechnology-Review-FINAL.ashx).

Solar Central. n.d. "Solar Markets Around The World." Accessed May 26, 2019. [http://solarcellcentral.com/markets\\_page.html](http://solarcellcentral.com/markets_page.html)

Wilkins, Tanya. 2018. "Alta Devices Sets Solar World Record - NASA Selects Alta Devices." Alta Devices (blog). December 12,

2018. <https://www.altadevices.com/solar-world-record-nasa-selects-alta-devices/>

Xiao, Jianling, Hanlin Fang, Rongbin Su, Kezheng Li, Jindong Song, Thomas F. Krauss, Juntao Li, and Emiliano R. Martins. 2018. "Paths to Light Trapping in Thin Film GaAs Solar Cells." *Optics Express* 26 (6): A341–A351

# BAB 5 SEL SURYA GENERASI KETIGA

---

Baik teknologi fotovoltaik (PV) generasi pertama yang menggunakan silikon dan teknologi generasi kedua yang menggunakan film tipis berbasis semikonduktor memiliki efisiensi konversi energi yang dibatasi oleh batas Shockley-Queisser (SQL) sebesar 33,7% (Shockley dan Queisser 1961). Namun, generasi baru teknologi PV tampaknya melampaui batas ini dengan menggunakan struktur perangkat baru, bahan baru, optik pemusatan, atau kombinasinya. Bahan alternatif tersebut telah menunjukkan potensi untuk melampaui produk PV yang tersedia secara komersial dalam hal efisiensi, biaya, dan ketahanan. Di antara bahan alternatif yang paling menjanjikan ini adalah bahan organik, peka zat warna, dan perovskit, sementara sel PV QuantumDot (QD) menawarkan efisiensi yang lebih besar melalui penggunaan struktur yang sangat kecil dan peka cahaya.

## 5.1 Sel PV Organik

Dalam terminologi kimia, bahan organik adalah bahan yang mengandung karbon. Bahan organik dapat berupa alam atau rekayasa dan banyak yang terkonjugasi. Bahan terkonjugasi adalah bahan di mana ikatan yang menyatukan atom

bergantian antara ikatan tunggal dan ganda. Struktur ikatan yang berselang-seling ini memungkinkan orbital atom tumpang tindih antara atom atau molekul yang berdekatan, sehingga memungkinkan elektron digunakan bersama antar atom. Hasil akhir dari orbital bersama ini adalah energi yang lebih rendah dan sistem yang lebih stabil dibandingkan dengan bahan serupa yang tidak terkonjugasi.

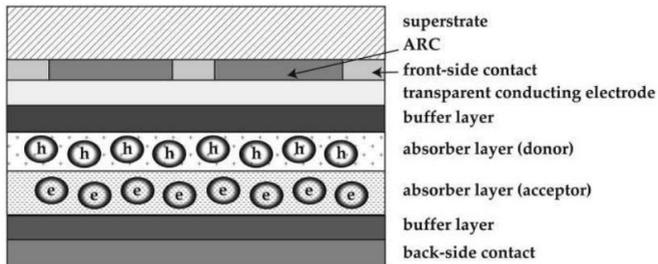
Karena struktur orbital bersama yang melekat pada bahan PV organik terkonjugasi, elektron tidak terkait dengan satu molekul atau atom melainkan dengan sistem lokal dari beberapa orbital molekul. Sebaliknya, elektron dalam semikonduktor diasosiasikan dengan pita valensi hanya dari satu atom atau molekul. Ketika semikonduktor terkena cahaya, elektron ini dirangsang ke keadaan energi yang lebih tinggi dalam kisaran energi yang disebut pita konduksi. Sebaliknya, ketika bahan organik terkonjugasi terkena cahaya, elektron tereksitasi ke keadaan energi yang lebih tinggi tetap terikat ke keadaan terlokalisasi. Elektron ini belum bebas untuk melakukan perjalanan melalui materi seperti halnya dengan elektron di pita konduksi semikonduktor memungkinkannya untuk melakukan perjalanan atau melompat dari satu keadaan terlokalisasi ke keadaan berikutnya. Memecah eksitasi fotogenerasi menjadi sepasang muatan bebas bergerak (lubang dan elektron) membutuhkan energi pada orde 100 meV (0,1 eV), yang signifikan dibandingkan dengan beberapa mili elektron volt yang diperlukan untuk memecahnya. pasangan elektron-lubang dalam semikonduktor (Nelson 2003). Kehadiran keadaan

terlokalisasi ini dan energi tambahan yang diperlukan untuk memungkinkan elektron melompat di antara mereka adalah perbedaan mendasar antara sel PV generasi pertama dan kedua dan OPV. Agar elektron dalam bahan organik dikumpulkan untuk menghasilkan listrik yang berguna, elektron yang difotogenerasi pertama-tama harus berdisosiasi dari lubang di eksiton dan kemudian melompat dari satu keadaan terlokalisasi ke keadaan lain hingga mencapai kontak dan mengalir ke sirkuit eksternal. Seseorang dapat menganggap sel PV generasi pertama atau kedua sebagai jalan raya, di mana elektron tidak terbebani oleh lampu lalu lintas dan dengan bahan bakar yang cukup (yaitu, gaya yang diciptakan oleh medan listrik), bergerak dengan mudah dalam jarak jauh. Bahan PV organik (OPV), di sisi lain, lebih seperti jalan permukaan, di mana elektron dan lubang bergerak atau melompat dari satu lampu lalu lintas dan persimpangan ke yang lain. Terhambat oleh lalu lintas dan pembatasan lainnya, rangsangan dalam bahan organik kurang bergerak dibandingkan pasangan lubang elektron yang sesuai dalam sel PV konvensional berbasis semikonduktor. Mobilitas rendah dikombinasikan dengan energi ekstra yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan elektrostatik antara elektron dan lubang dalam sebuah eksiton akhirnya menyebabkan efisiensi yang berkurang secara dramatis untuk sel PV organik. Faktanya, Struktur pita energi bahan organik tidak dijelaskan dalam hal energi pita konduksi dan valensi. Sebaliknya, struktur pita dicirikan oleh dua energi orbital molekul kunci. Tingkat energi pertama yang menarik adalah yang terkait dengan HOMO

yang merupakan orbital molekul yang ditempati tertinggi dalam kondisi gelap (nol terang). Energi LUMO, di sisi lain, sesuai dengan orbital molekul kosong terendah di bawah kondisi cahaya nol. Perbedaan antara tingkat energi LUMO dan HOMO kira-kira setara dengan celah pita semikonduktor dan seperti semikonduktor, menentukan foton energi terendah (panjang gelombang terpanjang) cahaya yang dapat diserap oleh bahan organik.

Seperti semikonduktor, perangkat PV organik dapat dibuat dengan satu lapisan bahan organik. Lapisan tunggal hanya terdiri dari bahan PV organik yang diapit di antara dua kontak listrik. Kontak dipilih sehingga perbedaan fungsi kerja antara dua kontak membentuk medan listrik melintasi bahan organik dan setiap elektron bebas tertarik ke kontak bermuatan positif sementara setiap lubang bebas tertarik ke kontak bermuatan negatif. Sama seperti semikonduktor lapisan tunggal, bagaimanapun, medan listrik ini lemah dan sebagian besar elektron dan lubang bergabung kembali sebelum mencapai kontak. Masalah semakin rumit, elektron tereksitasi oleh cahaya yang masuk tetap terikat pada lubangnya masing-masing dan ikatan terlokalisasi membatasi mereka dari perjalanan bebas melalui bahan PV organik. Akibatnya, satu-satunya rangsangan (yaitu, pasangan elektron-lubang terikat) yang sampai ke kontak adalah yang berdifusi di sana dalam 1–10 nm dari kontak dan bahkan ini mungkin atau mungkin tidak dipecah atau dipisahkan oleh arus listrik. bidang. Hasil akhirnya adalah bahwa perangkat berbasis lapisan tunggal bahan organik sangat tidak efisien, menghasilkan efisiensi

kuantum kurang dari 1% dan efisiensi konversi energi secara keseluruhan kurang dari 0,1% (Nelson 2003).



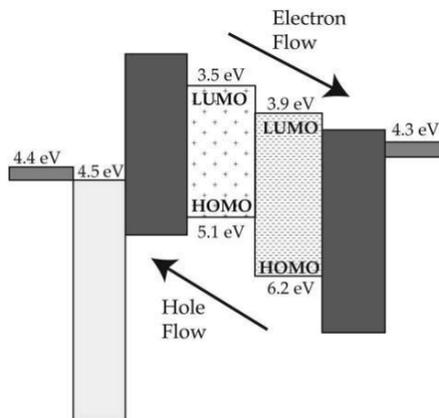
**GAMBAR 5.1**

Struktur sel fotovoltaik organik (OPV). Struktur sel PV terdiri dari lapisan penyerap aktif (akseptor dan donor), lapisan penyangga di sisi depan dan belakang lapisan aktif, kontak di kedua sisi sel, dan elektroda penghantar transparan. Elektroda konduktor transparan bertindak sebagai antarmuka resistansi rendah antara lapisan aktif dan kontak sisi depan. Lapisan penyangga di dekat bagian atas sel melindungi lapisan penyerap di bawahnya dan memfasilitasi pengangkutan lubang ke kontak sisi depan sambil memblokir transpor elektron. Lapisan penyangga di dekat bagian belakang sel melakukan yang sebaliknya, menghalangi transportasi lubang ke kontak sisi belakang sambil memfasilitasi transpor elektron.

Untuk meningkatkan efisiensi, bahan organik, seperti semikonduktor anorganik, juga dapat digabungkan menjadi perangkat bilayer (berbasis sambungan) untuk efisiensi yang lebih besar. Contoh sel PV organik junction tunggal, bilayer ditunjukkan pada: Gambar 5.1. Sel PV organik bergantung pada lapisan penyerap yang terdiri dari bahan akseptor (sebanding dengan semikonduktor tipe-n di sambungan pn) dan bahan donor (sebanding dengan semikonduktor tipe-p di sambungan pn).

Dalam hal energi (Gambar 5.2), tingkat energi LUMO dan HOMO lapisan penerima lebih rendah daripada tingkat energi

LUMO dan HOMO lapisan donor. Dalam bahan organik, perbedaan tingkat LUMO dan HOMO antara lapisan akseptor dan donor menciptakan medan listrik di persimpangan antara dua lapisan tipis. Medan listrik memiliki kekuatan yang cukup untuk memecah eksiton yang dihasilkan foto dan menciptakan elektron bebas dan lubang yang kemudian dapat melakukan perjalanan ke kontak masing-masing dengan melayang ke atas bukit energi (yaitu, lubang ke anoda) atau mengambang di bawah bukit energi (yaitu, elektron ke katoda).



**GAMBAR 5.2**

Struktur pita energi sel fotovoltaik organik (OPV). Struktur pita energi sesuai dengan struktur fisik yang ditunjukkan pada Gambar 5.1. Dalam istilah energi, lubang melayang ke atas bukit energi ke sisi depan sel (ke kiri pada diagram di atas) dan elektron mengalir menuruni bukit energi ke bagian belakang sel (ke kanan). Tingkat energi LUMO dan HOMO secara kasar analog dengan tingkat energi pita konduksi dan pita valensi dalam semikonduktor. Angka-angka yang ditunjukkan adalah perbedaan energi antara tingkat energi berlabel dan tingkat vakum dan mewakili fungsi kerja setiap lapisan. Secara desain, setiap lubang yang mencoba menggapung ke kanan dihalangi oleh lapisan penyangga di bagian belakang sel dan setiap elektron yang mencoba mengalir menuruni bukit energi ke kontak sisi depan dihalangi oleh lapisan penyangga di dekat bagian atas, dari sel.

Jumlah eksiton yang pecah tergantung pada berapa banyak yang dapat berdifusi ke antarmuka antara lapisan donor dan akseptor. Setiap rangsangan yang tidak mencapai antarmuka bergabung kembali dan tidak dikumpulkan. Panjang difusi pendek dari rangsangan ini telah membatasi efisiensi sel PV. Efisiensi sel riset terbaik per 2019 mencapai maksimal 15,6% (NREL 2019). Contoh lapisan yang dapat digunakan untuk membentuk struktur pita efektif untuk struktur sel PV organik bilayer tunggal-persimpangan (Gambar 5.1) diringkas menjadi Tabel 5.1. Lapisan atas (superstrate) sel PV adalah kaca tetapi dapat diganti dengan plastik atau bahan transparan lainnya yang memungkinkan panel surya sangat fleksibel dan struktur yang sangat cocok untuk sistem sel surya yang dapat dipakai. Di bawah superstrate adalah lapisan tipis indium tin oxide (ITO) yang mengumpulkan lubang yang dihasilkan oleh cahaya yang menyinari lapisan penyerap di bawahnya. ITO adalah oksida konduktor transparan (TCO) yang sangat populer digunakan sebagai kontak sisi depan sel PV untuk mengumpulkan pembawa muatan. Alternatif untuk ITO termasuk TCO lain seperti oksida timah dan seng oksida dan bahan lain termasuk polimer konduktif, lapisan logam yang sangat tipis, dan kawat nano.

**TABEL 5.1**

Komposisi Khas Sel Fotovoltaik Organik (OPV)

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Pasif, melindungi, dan memberikan stabilitas struktural pada sel PV
Sisi depan kontak	Emas (Au)	Mengumpulkan lubang
Antireflektif pelapis (ARC)	Lapisan mata ngengat	Meminimalkan pantulan cahaya dari sel PV
Transparan melakukan elektroda	Indium timah oksida (ITO)	Memberikan kontak resistansi rendah ke lapisan yang berdekatan
Lapisan penyangga	PEDOT-PSS (poli(3,4-etilenadioksitiofena)/ poli(stirenasulfonat))	Melindungi lapisan aktif (penyerap); memfasilitasi transportasi lubang; memblokir transpor elektron;
Lapisan aktif	Donor polimer konduktor atau semikonduktor (misalnya, poli(3-heksiltiofena)—P3HT) Akseptor fullerene (misalnya, Phenyl-C61butyric acid methyl ester—PCBM)	menyerap cahaya; menghasilkan kegembiraan
Lapisan penyangga	Bathokuproin (BCP)	Memfasilitasi transpor elektron; blok lubang transportasi
Sisi belakang kontak	Perak (Ag), aluminium (Al), magnesium (Mg)	Mengumpulkan elektron

*Sumber:* Spooner (nd) dan Forberich et al. (2008).

Di bawah kontak ITO adalah lapisan penyangga yang dirancang untuk memastikan kontak ohmik dan transportasi lubang yang efektif dari lapisan donor yang mendasarinya. Dalam konteks kinerja sel PV, kontak ohmik adalah kontak di mana arus melewati kontak dengan penurunan tegangan yang sangat kecil; akibatnya, kontrak ohmik tidak menurunkan atau membatasi kinerja sel PV. Sebaliknya, jenis kontak lain memerlukan penurunan tegangan yang lebih besar untuk memfasilitasi aliran arus, dan untuk alasan ini menghambat kinerja sel PV. PEDOT-PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate)) adalah

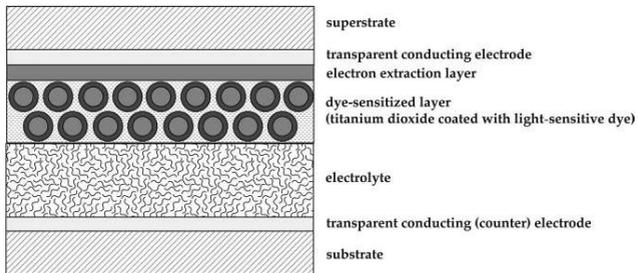
lapisan penyangga umum yang digunakan berdekatan dengan lapisan donor untuk meningkatkan kualitas ohmik antarmuka antara TCO dan sel PV lainnya dan untuk mendukung pengangkutan lubang ke kontak ITO. Lapisan penyangga seperti PEDOT-PSS juga mencegah oksigen masuk ke lapisan penyerap dan dengan demikian melindungi integritas dan mempertahankan kinerja sel PV (Benanti dan Venkataraman 2006). Di antara dua lapisan penyangga adalah lapisan penyerap kritis yang bertanggung jawab untuk menyerap cahaya, menciptakan rangsangan, dan memfasilitasi pengangkutan elektron dan lubang ke kontak masing-masing. Fullerene C60 dan turunannya adalah lapisan akseptor umum yang digunakan dalam sel PV organik, sedangkan lapisan donor sering terdiri dari turunan poli(fenilen vinilen) dan poli(alkiltiofena) (Benanti dan Venkataraman 2006). Lapisan donor mengangkut lubang dan lapisan akseptor mengangkut elektron ke kontak masing-masing. Efisiensi struktur heterojunction bilayer dapat ditingkatkan dengan membuat banyak sambungan (tersebar) di dalam sel daripada membuat sambungan planar tunggal.

## **5.2 Sel PV Peka Pewarna**

Tidak seperti kebanyakan teknologi PV, sel surya peka pewarna (DSC) bergantung pada elektrolit cair (atau dalam kasus terbatas padatan) selain proses difusi untuk mengoptimalkan perilaku PV. TheDSC terdiri dari enam lapisan dasar, seperti yang ditunjukkan pada:Gambar 5.3:

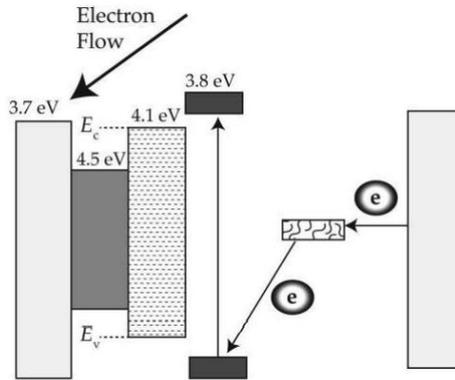
superstrate (di atas sel), elektroda konduktif transparan yang mengumpulkan elektron, lapisan ekstraksi elektron, lapisan peka zat warna yang secara aktif menyerap cahaya, elektrolit, dan elektroda lawan.

Lapisan yang peka terhadap zat warna terdiri dari lapisan semikonduktor pengangkut elektron dan lapisan terpisah dari zat warna fotosensitif atau, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3, semikonduktor pengangkut elektron berpori yang direndam dalam pewarna fotosensitif. Pendekatan semikonduktor berpori menyediakan area permukaan yang besar untuk pewarna fotosensitif untuk menempati dan menyerap cahaya yang masuk. Di bawah lapisan peka-pewarna adalah elektrolit yang bersentuhan dengan elektroda lawan yang melengkapi sel elektrokimia yang terkandung dalam arsitektur sel PV ini.



**GAMBAR 5.3**

Struktur sel PV yang peka terhadap pewarna. Lapisan aktif dari struktur dye-sensitized cell (DSC) terdiri dari partikel titanium dioksida yang dilapisi dengan pewarna fotosensitif. Ketika pewarna menyerap cahaya, seluruh molekul pewarna (bukan satu elektron) bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi. Molekul pewarna energi yang lebih tinggi siap menyumbangkan elektron ke partikel titanium dioksida dan lapisan ekstraksi elektron meningkatkan jumlah elektron yang dikumpulkan di sisi depan sel (elektroda konduktor transparan). Elektroda lawan dan elektrolit mengisi kembali elektron yang diekstraksi oleh titanium dioksida dari pewarna. DSC berbeda dari sel PV lainnya karena hanya mengangkut elektron bebas dan tidak ada lubang.



**GAMBAR 5.4**

Struktur pita energi sel PV yang peka terhadap warna. Struktur pita energi sesuai dengan struktur fisik yang ditunjukkan pada Gambar 5.3. Ketika molekul pewarna menyerap energi dan pindah ke tingkat energi yang lebih tinggi, elektron dalam molekul pewarna kemudian bebas mengalir menuruni bukit energi ke sisi depan sel. Tidak ada lubang bebas yang dihasilkan di DSC. Angka-angka yang ditunjukkan adalah perbedaan energi antara tingkat energi berlabel dan tingkat vakum dan mewakili fungsi kerja setiap lapisan. Elektroda lawan dan elektrolit cair di bagian belakang sel mengisi kembali elektron yang hilang oleh pewarna saat menyerap foton cahaya.

Diagram pita energi DSC (Gambar 5.4) mirip dengan sel PV lainnya dengan tiga pengecualian utama. Pertama, foton cahaya yang masuk menyebabkan seluruh molekul pewarna (berlawanan dengan satu elektron) bergerak dari energi yang lebih rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Lapisan transpor elektron (misalnya, semikonduktor berpori) dengan mudah mengekstraksi elektron dari molekul pewarna berenergi dan mengirimkannya ke kontak sisi depan. Kedua, tidak seperti banyak struktur sel PV, elektrolit cair mengisi ulang elektron dalam molekul pewarna yang tereksitasi oleh cahaya dan ditransfer keluar dari sel PV melalui sisi depan.

Dan, akhirnya, DSC hanya memanggil aliran elektron (yaitu, tidak ada lubang) dalam produksi arus.

Komposisi DSC khas dijelaskan dalam: Tabel 5.2. Titanium oksida membuat transporter elektron berpori yang murah, tersedia, dan bahan berbasis rutenium adalah kandidat yang sangat baik untuk pewarna karena fotosensitifitasnya. Elektrolit cair berbasis iodida adalah pilihan umum untuk mengisi kembali elektron dalam molekul pewarna berbasis rutenium. Dan, elektroda lawan mungkin atau mungkin tidak dilapisi dengan katalis seperti platinum untuk mempromosikan transfer elektron ke elektrolit dan selanjutnya, seluruh sel PV. Untuk memastikan bahwa elektrolit cair tidak bocor keluar dari sel, seluruh DSC disegel sepenuhnya setelah fabrikasi.

**TABEL 5.2**  
Komposisi Khas Sel Peka Pewarna (DSC)

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Memberikan stabilitas struktural; menyegel sel
Ekstraksi elektron lapisan	Grafena, tungsten oksida	Meningkatkan koleksi elektron
Transparan elektroda konduktor	Fluor timah oksida (FTO)	Mengumpulkan elektron
Lapisan peka-pewarna	Titanium oksida (TiO <sub>2</sub> ) nanopartikel direndam dalam a pewarna rutenium fotosensitif	Molekul pewarna menyerap cahaya; TiO <sub>2</sub> menyerap elektron dari pewarna molekul dan transpor elektron
Elektrolit	Iodida (I <sub>2</sub> ), tri-iodida (I <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Mengisi kembali elektron yang hilang dalam molekul pewarna
elektroda kontra	Berbagai logam dan paduan, bahan karbon, polimer konduktif, senyawa logam transisi	Melengkapi sel elektrokimia

Sumber: Chen (2015) dan Zheng, Tachibana, dan Kalantar-Zadeh (2010).

Karena penyerapan spektral pewarna fotosensitif yang digunakan dalam DSC tidak kompatibel dengan sinar matahari seperti silikon, efisiensi perangkat ini untuk aplikasi energi surya konvensional dapat dibatasi. Pada 2019, DSC terbaik mencapai efisiensi optimal dalam menanggapi sinar matahari (AMI 1.5) sekitar 24% (NREL 2019). Namun, ketidakcocokan dengan sinar matahari ini dapat menjadi keuntungan bagi sel PV yang dapat dipakai yang mengandalkan sumber buatan dan alami (sinar matahari) untuk beroperasi. Sumber cahaya buatan cenderung memiliki spektrum merah yang lebih sedikit daripada sinar matahari, sehingga membuatnya lebih kompatibel dengan DSC daripada silikon.

DSC, seperti teknologi film tipis lainnya, lebih kuat secara mekanis daripada sel PV silikon tradisional. Dengan demikian, mereka membutuhkan lebih sedikit perlindungan dan superstrate kaca sering diganti dengan lapisan tipis plastik dalam panel kemasan. Lapisan tipis ini memungkinkan lebih banyak panas dilepaskan selama operasi, yang pada gilirannya, meminimalkan kerugian efisiensi yang disebabkan oleh pemanasan sendiri yang umum terjadi pada panel surya silikon.

Karena DSC hanya mengangkut elektron dan bukan lubang, ada juga satu kesempatan lebih sedikit bagi elektron untuk bergabung kembali yang pada akhirnya berarti bahwa persentase elektron tereksitasi yang lebih tinggi dikumpulkan sebagai arus. Tidak adanya lubang fotogenerasi sangat menguntungkan dalam kondisi cahaya rendah atau variabel

yang konsisten dengan sumber cahaya buatan dan aplikasi PV yang dapat dipakai. Di bawah kondisi cahaya rendah ini, banyak teknologi PV "mati" ketika kebocoran dan rekombinasi membanjiri elektron dan lubang yang dihasilkan fotogenerasi. Sel PV DSC tidak terputus dan terus beroperasi dalam kondisi cahaya rendah.

Kerugian utama dari DSC adalah elektrolit cair yang mengharuskan sel disegel selama pembuatan dan tetap disegel selama masa pakainya. Pada suhu yang terlalu rendah, elektrolit dapat membeku yang menurunkan produksi daya ke nol dan juga dapat merusak panel DSC secara fisik. Pada suhu tinggi, elektrolit dapat mengembang, menghasilkan retakan, dan bocor keluar dari panel surya sama sekali. Untungnya, dalam aplikasi sel surya yang dapat dipakai, suhu ekstrem jauh lebih jarang daripada di instalasi panel surya luar ruangan konvensional, yang secara dramatis mengurangi risiko kegagalan akibat suhu. DSC juga terhambat oleh tingginya biaya platinum ketika digunakan sebagai katalis pada elektroda lawan. Biaya yang lebih tinggi membatasi daya saing ekonomi DSC dengan teknologi PV berbiaya rendah lainnya.

### **5.3 Perovskit**

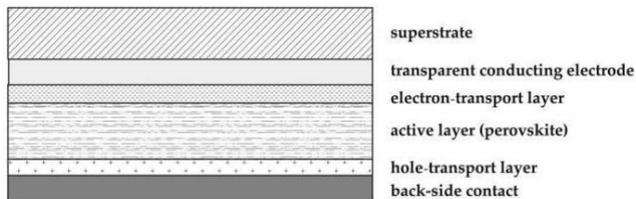
Keluarga bahan sel PV generasi ketiga lainnya adalah perovskit, dinamai berdasarkan struktur mineral perovskit. Mineral perovskit tersusun dalam struktur seperti kubus dan mengandung kalsium, titanium, dan oksigen. gen ( $\text{CaTiO}_3$ )

disusun sebagai satu jenis ion bermuatan positif besar di tengah struktur kubik, jenis lain dari ion bermuatan positif terletak di sudut, dan lebih kecil, ion bermuatan negatif dari jenis lain di sepanjang permukaan kubus. Dalam dunia teknologi PV, istilah perovskit mengacu pada senyawa apa pun yang memiliki struktur serupa dengan mineral itu sendiri. Dan, dengan memanipulasi tiga jenis ion yang membentuk struktur perovskit, berbagai sifat yang diinginkan dapat diperoleh termasuk sensitivitas PV (Fan, Sun, dan Wang 2015), superkonduktivitas (He et al. 2001), dan magnetoresistansi raksasa. (Shimakawa, Kubo, dan Manako 1996). Ketika dikembangkan untuk sel PV, ion di tengah kubus perovskit biasanya merupakan ion organik besar (misalnya, metilamonium atau formamidinium), ion di sudut adalah molekul besar dan anorganik seperti timbal, dan ion yang lebih kecil di permukaan kubus adalah ion halogen seperti klorida atau iodida (Fan, Sun, dan Wang 2015).

Struktur dasar sel surya perovskite (PSC) ditunjukkan pada: Gambar 5.5. Ini mirip dengan struktur DSC kecuali bahwa tidak ada elektrolit yang terlibat dan PSC mengangkut baik elektron (ke elektroda transparan) dan hole (ke elektroda belakang). Lapisan transpor memfasilitasi pergerakan elektron dan lubang.

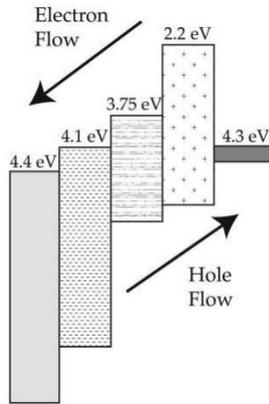
Struktur pita energi untuk sel PV perovskit ditunjukkan pada: Gambar 5.6 berdasarkan lapisan yang dijelaskan secara rinci di Tabel 5.3 dan struktur dari Gambar 5.5. Elektron yang dihasilkan dari perovskit ketika cahaya aliran yang diserap

menuruni bukit energi ke kiri menuju elektroda transparan dengan bantuan lapisan transpor elektron titanium dioksida. Di sisi lain PSC, lapisan transpor lubang memfasilitasi apungan lubang ke atas ke tingkat energi elektroda perak.



**GAMBAR 5.5**

Struktur sel PV perovskit. Struktur sel PV perovskit mirip dengan sel PV silikon amorf (Gambar 3.4). Perovskit adalah penyerap cahaya yang kuat dan mereka bertindak mirip dengan lapisan isolator di sambungan pin dengan menyediakan volume yang signifikan untuk penyerapan cahaya dan pembangkitan eksiton berikutnya. Excitons dipecah menjadi elektron bebas dan lubang bebas. Lubang bebas melakukan perjalanan melalui lapisan transport lubang ke bagian bawah sel untuk pengumpulan sementara elektron bebas berjalan melalui lapisan elektron sehingga bagian atas sel untuk pengumpulan. Struktur planar yang ditunjukkan di atas dapat diganti dengan lapisan mesopori di mana perovskit melapisi partikel titanium dioksida, mirip dengan struktur sel peka-pewarna (DSC) yang ditunjukkan pada Gambar 5.3.



**GAMBAR 5.6**

Struktur pita energi sel PV perovskit. Elektron mengalir menuruni bukit energi dari lapisan perovskit aktif ke lapisan transpor elektron dan ke elektroda konduktor transparan untuk dikumpulkan. Lubang-lubang melayang ke atas dalam arah yang berlawanan menuju bagian belakang sel dan dikumpulkan pada kontak sisi belakang.

**TABEL 5.3**

Komposisi Khas Sel Surya Perovskite (PSC)

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Memberikan perlindungan dan stabilitas struktural
Konduksi transparan elektroda	Fluor timah oksida (FTO)	Mengumpulkan elektron
Lapisan transpor elektron	Titanium dioksida (TiO <sub>2</sub> )	Mengangkut elektron
Lapisan aktif	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> •Cl <sub>2</sub> perovskit	Menyerap cahaya
Lapisan transportasi lubang	Spiro-OmeTAD	Mengangkut lubang
Elektroda belakang	Perak (Ag)	Mengumpulkan lubang

Sumber: Da, Xuan, dan Li (2018).

Selain karakteristik penyerapan yang kuat dan efisiensi tinggi, tiga molekul yang membentuk struktur PSC dapat dipilih untuk menyesuaikan celah pita perovskit dan dengan demikian menyetel spektrum penyerapan agar lebih cocok dengan spektrum cahaya tampak dan inframerah dekat dari cahaya yang masuk. cahaya. Sel PV yang terbuat dari bahan perovskit dapat dicocokkan dengan berbagai sumber cahaya alami dan buatan untuk kinerja maksimum di lingkungan tertentu. Sebaliknya, penyetelan celah pita tidak mungkin dilakukan dengan silikon dan banyak teknologi PV semikonduktor lainnya.

Kemajuan pesat dalam teknik deposisi dan kemajuan dalam material perovskite telah memungkinkan efisiensi sel penelitian mereka meningkat secara dramatis dalam beberapa tahun terakhir dari 13% pada 2013 menjadi 24,2% pada 2019 (NREL 2019). Koefisien penyerapan perovskit yang tinggi telah memungkinkan sel PV yang sangat tipis, pada urutan ratusan nanometer, menjadi layak dan praktis. Film yang sangat tipis, di samping biaya pemrosesan dan bahan baku yang rendah, memungkinkan berbagai sistem dan footprint sel surya yang fleksibel, ringan, dan dapat dipakai yang murah.

Khususnya yang patut diperhatikan untuk produksi produk PV yang dapat dikenakan adalah pencetakan ink-jet suhu rendah dari bahan perovskit ke dalam struktur PV ke dalam foil tipis (Saule Technologies nd). Pencetakan ink-jet tidak hanya memungkinkan pembuatan prototipe cepat dan manufaktur

berbiaya rendah tetapi juga memungkinkan kontrol morfologi dan homogenitas film melalui parameter pencetakan utama dan penyesuaian karakteristik pembasahan dan kimia melalui penyesuaian larutan prekursor. Tidak hanya pencetakan ink-jet dan metode fabrikasi dengan kompleksitas rendah lainnya menurunkan biaya produksi PSC, tetapi mereka juga mendukung pembuatan prototipe cepat perangkat yang dapat dipakai yang menggunakan sel surya dan sistem untuk menghasilkan energi listrik dan pasokan daya.

tabilitas jangka panjang perovskit tetap tidak dapat diprediksi, yang membatasi penerapannya pada perangkat PV konvensional atau wearable yang diperkirakan akan bertahan selama bertahun-tahun. Kemajuan dalam lapisan transpor elektron telah mengurangi degradasi dengan adanya sinar matahari (Hutchins 2019). Namun, banyak perovskit terdegradasi secara dramatis dengan adanya kelembaban dan juga dapat terdegradasi secara internal saat dipanaskan. Histeresis yang baru-baru ini ditemukan dalam sel PV perovskit juga menjadi perhatian. Perbaikan stabilitas dan histeresis adalah topik penelitian berkelanjutan (Leijtens et al. 2015).

#### **5.4 Sel PV Quantum Dot**

QD adalah partikel yang ukurannya lebih kecil dari radius eksiton Bohr semikonduktor dari mana ia dibuat. Jari-jari eksiton Bohr didefinisikan sebagai jarak yang paling mungkin

antara elektron dan lubang dalam pasangan elektron-lubang yang dihasilkan dari injeksi energi (misalnya, cahaya) ke dalam atom. Jari-jari eksiton Bohr bergantung pada massa efektif elektron dan hole dalam semikonduktor, berada pada orde nanometer, dan ditabulasikan untuk QD umum dalam Tabel 5.4. Karena ukuran QD menyusut di bawah radius eksiton Bohr, keadaan energi menjadi diskrit daripada ada di pita energi kontinu (misalnya, pita konduksi dan valensi) seperti halnya dalam semikonduktor tradisional. Keadaan energi diskrit berarti bahwa elektron yang tereksitasi oleh cahaya hanya dapat bergerak ke tingkat energi tertentu lainnya daripada hampir semua tingkat energi yang lebih besar dari energi pita konduksi. Selanjutnya, tingkat energi diskrit ini dapat disetel dengan menyesuaikan ukuran QD. Semakin kecil QD, semakin sensitif terhadap panjang gelombang yang lebih pendek. Ketika ukuran QD menurun, celah pita meningkat, dan panjang gelombang cahaya maksimum yang dapat diserap QD berkurang menurut Planck-Einstein hubungan:

$$\lambda_{maks} = \frac{hc}{E_g} \quad (5.1)$$

dimana  $h$  adalah konstanta Planck ( $4.14 \times 10^{-15}$  eV detik),  $c$  adalah kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s di udara), dan,  $E_g$  adalah celah pita dalam volt electron.

Dengan tunabilitas semacam ini, QD dapat dibuat menjadi sel PV yang menyerap cahaya dari sebagian besar spektrum sinar matahari, terutama ultraviolet (UV) dan panjang gelombang

inframerah yang tidak diserap secara efisien oleh jenis bahan PV lainnya. Celah pita yang dapat disetel juga dapat digunakan untuk membuat sel PV yang paling cocok untuk memanen cahaya dari sumber cahaya lain. Kemungkinan ini tidak terlalu penting untuk panel surya konvensional yang hampir tanpa kecuali dioptimalkan untuk memanen sinar matahari alami untuk energi. Namun, untuk sistem sel surya yang dapat dipakai, sel PV QD dapat dioptimalkan untuk sumber cahaya dominan di lingkungan pengguna apakah itu sinar matahari alami atau sumber cahaya buatan tertentu (misalnya, fluoresen, pijar).

**TABEL 5.4**

Exciton Bohr Radius dan Bandgap untuk Common QuantumDot Photovoltaic (QD PV) Bahan Sel

titik kuantum Semikonduktor	Semangat Bohr Jari-jari (nm)	celah pita $E_g$ (eV)		
		Radius QD >40 nm	Radius QD = 10 nm	Radius QD = 5 nm
PbS (timbal sulfida)	40.0	0,41	0.6	1.0
GaAs (gallium arsenide)	28.0	1.43	1.8	3.0
CdTe (cadmium telluride)	15.0	1.50	1.9	2.7
CdSe (cadmium selenide)	10.6	1.74	2.0	2.8
CdS (cadmium sulfide)	5.6	2.53	2.6	3.0

Sumber: Jasim (2015).

Juga, karena tingkat energi diskrit yang merupakan karakteristik QD, menjadi mungkin bagi satu foton cahaya untuk menghasilkan lebih dari satu elektron. Proses ini, yang disebut multiple exciton generation (MEG) adalah hasil dari ionisasi tumbukan oleh elektron yang tereksitasi. Pada

sebagian besar semikonduktor, sebuah elektron tereksitasi ke pita konduksi oleh foton cahaya rileks ke bagian bawah pita konduksi dalam proses yang melepaskan panas. Namun, dalam QD, elektron yang tereksitasi dapat bertabrakan dengan elektron lain, memberikan energi ke elektron tersebut yang cukup untuk elektron tersebut dikumpulkan sebagai arus. Efek multiplikasi ini disebabkan oleh ionisasi tumbukan dan produksi yang dihasilkan dari beberapa rangsangan untuk satu foton memungkinkan sel QD PV untuk melebihi efisiensi SQL sebesar 33,7% (Shockley dan Queisser 1961). Tantangan dalam mengembangkan proses untuk sintesis dan produksi film QD yang mengurangi jebakan, cacat, dan tempat lain di mana elektron bisa hilang sebelum pengumpulan telah menahan QD untuk melampaui SQL. Pada tahun 2019, efisiensi sel penelitian terbaik untuk quantum dot (QD) tercatat sebesar 16,6% (NREL 2019). Karena QD kecil, mereka juga hemat ruang. Lapisan QD dalam sel PV dapat terdiri dari sedikitnya 100 atom, berpotensi menghasilkan sel PV yang sangat tipis yang sangat fleksibel, dan dengan proses fabrikasi tertentu, sangat murah. QD dapat dibuat menjadi sel PV dalam beberapa cara berbeda, banyak di antaranya meniru struktur sel PV yang ada. Misalnya, QD dapat dimasukkan ke dalam struktur DSC yang mirip dengan dan tempat-tempat lain di mana elektron bisa hilang sebelum pengumpulan telah menahan QD agar tidak melampaui SQL. Pada tahun 2019, efisiensi sel penelitian terbaik untuk quantum dot (QD) tercatat sebesar 16,6% (NREL 2019). Karena QD kecil, mereka juga hemat ruang. Lapisan QD dalam sel PV dapat terdiri dari

sedikitnya 100 atom, berpotensi menghasilkan sel PV yang sangat tipis yang sangat fleksibel, dan dengan proses fabrikasi tertentu, sangat murah. QD dapat dibuat menjadi sel PV dalam beberapa cara berbeda, banyak di antaranya meniru struktur sel PV yang ada. Misalnya, QD dapat dimasukkan ke dalam struktur DSC yang mirip dengan dan tempat-tempat lain di mana elektron bisa hilang sebelum pengumpulan telah menahan QD agar tidak melampaui SQL. Pada tahun 2019, efisiensi sel penelitian terbaik untuk quantum dot (QD) tercatat sebesar 16,6% (NREL 2019). Karena QD kecil, mereka juga hemat ruang. Lapisan QD dalam sel PV dapat terdiri dari sedikitnya 100 atom, berpotensi menghasilkan sel PV yang sangat tipis yang sangat fleksibel, dan dengan proses fabrikasi tertentu, sangat murah. QD dapat dibuat menjadi sel PV dalam beberapa cara berbeda, banyak di antaranya meniru struktur sel PV yang ada. Misalnya, QD dapat dimasukkan ke dalam struktur DSC yang mirip dengan Lapisan QD dalam sel PV dapat terdiri dari sedikitnya 100 atom, berpotensi menghasilkan sel PV yang sangat tipis yang sangat fleksibel, dan dengan proses fabrikasi tertentu, sangat murah. QD dapat dibuat menjadi sel PV dalam beberapa cara berbeda, banyak di antaranya meniru struktur sel PV yang ada. Misalnya, QD dapat dimasukkan ke dalam struktur DSC yang mirip dengan Lapisan QD dalam sel PV dapat terdiri dari sedikitnya 100 atom, berpotensi menghasilkan sel PV yang sangat tipis yang sangat fleksibel, dan dengan proses fabrikasi tertentu, sangat murah. QD dapat dibuat menjadi sel PV dalam beberapa cara berbeda, banyak di antaranya meniru struktur sel PV yang ada. Misalnya, QD

dapat dimasukkan ke dalam struktur DSC yang mirip dengan Gambar 5.3 menggunakan lapisan bahan seperti yang dijelaskan dalam Tabel 5.5. Di tempat molekul pewarna fotosensitif bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi pada penyerapan cahaya, partikel QD menyerap cahaya, menyebabkan elektron tereksitasi ke salah satu tingkat energi diskrit yang lebih tinggi yang tersedia di QD. Setelah dalam keadaan tereksitasi ini, elektron dapat berdampak mengionisasi elektron lain atau mengalir ke titanium dioksida (lapisan transpor electron).

**TABEL 5.5**

Sel PV Tersensitisasi QD Khas

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Memberikan stabilitas struktural dan menyegel sel
Transparan elektroda konduktor	oksida timah fluor (FTO)	Mengumpulkan elektron
Transpor elektron lapisan	Titanium dioksida (TiO <sub>2</sub> )	Mengangkut elektron ke elektroda transparan
Lapisan aktif	CdS, CdSe QDs	menyerap cahaya; menghasilkan
Elektrolit	Elektrolit polisulfida	excitons Mengisi ulang elektron
elektroda kontra	Kuningan dilapisi dengan: tembaga sulfida (Cu <sub>2</sub> S)	Mengembalikan elektron ke sel elektrokimia dan mengkatalisis (mempromosikan) proses; memantulkan cahaya kembali ke sel PV

Sumber: Jasim (2015), Pan dkk. (2018), dan Wu et al. (2017).

Kemudian ke elektroda transparan di bagian atas sel PV. Sementara itu, elektrolit (cair atau padat) di bawah lapisan QD mengisi kembali elektron yang hilang dari QD ke lapisan transpor elektron. Sel PV tersensitisasi QD menggunakan QD saja dan bersama dengan pewarna fotosensitif telah ditunjukkan dalam literatur (Jasim 2015).

Seperti halnya DSC, elektrolit cair sulit diatur dan membatasi keandalan modul surya yang dihasilkan. Elektrolit padat sulit ditemukan. Untuk mengatasi masalah ini, sel PV QD juga dapat dibuat tanpa elektrolit. Struktur yang dihasilkan mirip dengan PSC (Gambar 5.5). Sebuah heterojungsi QD PV khas (Tabel 5.6) dibuat dengan struktur ini berisi film QD yang dibuat berdekatan dengan lapisan oksida semikonduktor. Sama seperti pada DSC, lapisan ini berfungsi sebagai sarana untuk mengangkut elektron dari lapisan QD ke elektroda transparan. Namun, di sisi lain lapisan QD, lapisan elektrolit dihilangkan dan lapisan transport lubang opsional memfasilitasi pergerakan lubang yang dihasilkan dalam QD ke kontak sisi belakang dalam sel PV.

**TABEL 5.6**

Contoh Sel PV Heterojungsi Quantum Dot (QD)

Lapisan	Bahan	Fungsi
superstrate	Kaca	Memberikan perlindungan dan stabilitas struktural
Konduksi transparan elektroda	Indium timah oksida	Mengumpulkan elektron
Lapisan transpor elektron	Seng oksida (ZnO)	Mengangkut elektron
Lapisan aktif	Timbal sulfida (PbS) QDs	Menyerap cahaya
Lapisan transportasi lubang	Molibdenum oksida (MoO <sub>3</sub> )	Mengangkut lubang
Kontak sisi belakang	Emas (Au)	Mengumpulkan lubang

*Sumber:* Sogabe, Shen, dan Yamaguchi (2016).

Beberapa arsitektur lain untuk sel PV dapat mendukung sel QD PV. Sambungan logam/semikonduktor, sel QD/silikon hibrida, dan struktur pin (mirip dengan sel PV silikon amorf) tersedia dan perkembangannya berkembang pesat untuk memanfaatkan struktur dan metode fabrikasi/perakitan

canggih (Jasim 2015). Namun, degradasi sel surya QD di hadapan kelembaban dan sinar UV terus membatasi viabilitas komersial dan masa pakainya. Dan, toksisitas yang melekat pada QD yang paling umum, yang mengandung logam berat seperti kadmium, selenium, atau timbal, membuatnya sangat beracun dan berbahaya bagi lingkungan di akhir siklus hidupnya. Toksisitas mereka membatasi daya tarik mereka untuk PV yang dapat dikenakan.

## **5.5 Ringkasan**

Dengan cara yang berbeda, teknologi generasi ketiga yang dijelaskan dalam bab ini mampu melebihi SQL sebesar 33,7% yang ditetapkan untuk sel PV generasi pertama dan kedua berdasarkan semikonduktor anorganik. Dalam sel PV QD, misalnya, satu foton dapat menghasilkan beberapa pembawa arus melalui proses MEG. Akibatnya, efisiensi tertinggi sel sambungan tunggal berbasis QD mendekati 44% (Sogabe, Shen, dan Yamaguchi 2016). Di antara sel PV organik, potensi untuk melampaui SQL masih menjadi bahan perdebatan. Kebijakan konvensional menyatakan bahwa sambungan tunggal, sel PV organik harus memiliki efisiensi tertinggi yang lebih rendah daripada SQL karena energi tambahan yang diperlukan untuk memisahkan elektron dan lubang dalam eksitasi fotogenerasi. Namun, literatur terbaru telah menantang asumsi ini dengan menjelajahi fisi eksiton tunggal (di mana satu foton dapat menghasilkan dua pasang elektron dan lubang sel PV anorganik) dan rekombinasi yang

bergantung pada medan. Dalam yang terakhir, mempertahankan medan listrik yang tinggi di persimpangan antara lapisan donor dan akseptor (Gambar 5.1) mengurangi rekombinasi elektron dan hole dan meningkatkan jumlah pembawa arus yang dapat dikumpulkan pada kontak, sehingga meningkatkan faktor pengisian sel dan meningkatkan efisiensi maksimum yang mungkin (Trukhanov, Bruevich, dan Paraschuk 2015). Dalam teknologi berbasis perovskite, koleksi hot carrier adalah rute utama untuk melampaui SQL. Kemajuan terbaru dalam sel PV perovskit telah menunjukkan potensi untuk memanen lebih banyak arus dengan memperpanjang waktu pendinginan dan waktu pengangkutan pembawa panas masing-masing menjadi puluhan pico-detik dan ratusan nanometer. Ketika pembawa panas membutuhkan waktu lebih lama untuk termalisasi atau mendinginkan kembali ke keadaan energi yang lebih rendah, mereka dapat melakukan perjalanan lebih jauh dan, dengan demikian, lebih mungkin mencapai kontak sel PV di mana mereka dapat dipanen dan dikumpulkan sebagai arus (Guo et al. 2017) . Teknologi sel PV lainnya, termasuk DSC, dapat mencapai efisiensi di luar SQL melalui struktur perangkat yang mencakup beberapa sambungan, bahan celah pita yang dapat disetel, desain optik alternatif, atau kombinasinya. Secara total, teknologi PV generasi ketiga berperilaku sangat berbeda dari teknologi generasi pertama dan kedua, menjanjikan efisiensi yang belum sepenuhnya dieksploitasi.

## Referensi

Benanti, Travis L., and D. Venkataraman. 2006. "Organic Solar Cells: An Overview Focusing on Active Layer Morphology." *Photosynthesis Research* 87 (1): 73–81.

Chen, Lung-Chien. 2015. "Dye-Sensitized Solar Cells with Graphene Electron Extraction Layer." In *Optoelectronics - Materials and Devices*, edited by Sergei L. Pyshkin and John Ballato. London, England: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/60644>

Da, Yun, Yimin Xuan, and Qiang Li. 2018. "Quantifying Energy Losses in Planar Perovskite Solar Cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 174: 206–213.

Fan, Zhen, Kuan Sun, and John Wang. 2015. "Perovskites for Photovoltaics: A Combined Review of Organic–Inorganic Halide Perovskites and Ferroelectric Oxide Perovskites." *Journal of Materials Chemistry A* 3 (37): 18809–18828. <https://doi.org/10.1039/C5TA04235F>.

Forberich, Karen, Gilles Dennler, Markus C. Scharber, Kurt Hingerl, Thomas Fromherz, and Christoph J. Brabec. 2008. "Performance Improvement of Organic Solar Cells with Moth Eye Anti-Reflection Coating." *Thin Solid Films, Proceedings on Advanced Materials and Concepts for Photovoltaics EMRS 2007 Conference, Strasbourg, France*, 516 (20): 7167–7170. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.088>

Guo, Zhi, Yan Wan, Mengjin Yang, Jordan Snaider, Kai Zhu, and Libai Huang. 2017. "Long-Range Hot-Carrier Transport in Hybrid Perovskites Visualized by Ultrafast Microscopy." *Science* 356 (6333): 59–62. <https://doi.org/10.1126/science.aam7744>.

He, T., Q. Huang, A. P. Ramirez, Y. Wang, K. A. Regan, N. Rogado, M. A. Hayward, et al. 2001. "Superconductivity in the Non-Oxide Perovskite MgCNi<sub>3</sub>." *Nature* 411 (6833): 54. <https://doi.org/10.1038/35075014>.

Hutchins, Mark. 2019. "It's All in the Electrons – Japanese Scientists Give Perovskites a Push." *PV Magazine International*, January 23, 2019. <https://www.pv-magazine.com/2019/01/23/its-all-in-the-electrons-japanese-scientistsgive-perovskites-a-push/>.

Iqbal, Muhammad Zahir, and Sana Khan. 2018. "Progress in the Performance of Dye Sensitized Solar Cells by Incorporating Cost Effective Counter Electrodes." *Solar Energy* 160 (January): 130–52.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.060>.

Jasim, Khalil Ebrahim. 2015. "Quantum Dots Solar Cells." In *Solar Cells - New Approaches and Reviews*. London, England: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/59159>

Leijtens, Tomas, Giles E. Eperon, Nakita K. Noel, Severin N. Habisreutinger, Annamaria Petrozza, and Henry J. Snaith. 2015. "Stability of Metal Halide Perovskite Solar Cells." *Advanced Energy Materials* 5 (20): 1500963.

Nelson, Jenny. 2003. "Organic and Plastic Solar Cells." In *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 484–511. Boca Raton, Florida: CRC Press

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2019. "Best Research-Cell Efficiency." <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

Pan, Zhenxiao, Huashang Rao, Iván Mora-Seró, Juan Bisquert, and Xinhua Zhong. 2018. "Quantum Dot-Sensitized Solar Cells." *Chemical Society Reviews* 47 (20): 7659–7702. <https://doi.org/10.1039/C8CS00431E>.

Saule Technologies. n.d. Solar Cells Reimagined. Accessed May 12, 2019. [https:// sauletech.com/](https://sauletech.com/)

Shimakawa, Y., Y. Kubo, and T. Manako. 1996. "Giant Magnetoresistance in  $Ti_2Mn_2O_7$  with the Pyrochlore Structure." *Nature* 379 (6560): 53. <https://doi.org/10.1038/379053a0>

Shockley, William, and Hans J. Queisser. 1961. "Detailed Balance Limit of Efficiency of pn Junction Solar Cells." *Journal of Applied Physics* 32 (3): 510–519.

Sogabe, Tomah, Qing Shen, and Koichi Yamaguchi. 2016. "Recent Progress on Quantum Dot Solar Cells: A Review." *Journal of Photonics for Energy* 6 (4): 040901. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.6.040901>.

Spooner, Emma. n.d. "Organic Photovoltaics: An Introduction." Ossila. Accessed May 24, 2019. <https://www.ossila.com/pages/organic-photovoltaics-introduction>.

Trukhanov, Vasily A., Vladimir V. Bruevich, and Dmitry Yu Paraschuk. 2015. "Fill Factor in Organic Solar Cells Can Exceed the Shockley-Queisser Limit." *Scientific Reports* 5 (June): 11478. <https://doi.org/10.1038/srep11478>.

Wu, Jihuai, Zhang Lan, Jianming Lin, Miaoliang Huang, Yunfang Huang, Leqing Fan, Genggeng Luo, Yu Lin, Yimin Xie, and Yuelin Wei. 2017. "Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells." *Chemical Society Reviews* 46 (19): 5975–6023. <https://doi.org/10.1039/C6CS00752J>.

Zheng, Haidong, Yasuhiro Tachibana, and Kourosh Kalantar-Zadeh. 2010. "DyeSensitized Solar Cells Based on WO<sub>3</sub>." *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids* 26 (24): 19148–19152. <https://doi.org/10.1021/la103692y>

## BAB 6 ARRAY SEL PV

---

Sambungan langsung antara sel fotovoltaik (PV) dan baterai, perangkat portabel, atau perangkat wearable mengundang masalah. Tegangan yang dihasilkan oleh satu sel PV sangat rendah sehingga sebagian besar baterai tidak akan menyadari keberadaan sel tersebut, apalagi terhubung dan memasok daya. Selain itu, arus yang dihasilkan oleh satu sel hanya cukup untuk memberi daya pada perangkat terkecil yang dapat dikenakan. Dan, fluktuasi arus dengan kondisi pencahayaan yang melekat pada sistem yang dapat dikenakan akan mendorong baterai ke kematian dini dan tertentu. Untuk alasan ini, sel PV dalam sistem yang dapat dikenakan harus beralih ke susunan sel PV untuk memasok tegangan dan arus yang kompatibel dengan perangkat yang mereka perjuangkan untuk diberi daya. Dihubungkan secara seri, string sel PV menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, dan terhubung secara paralel, beberapa string sel PV menghasilkan arus yang lebih tinggi dan daya yang lebih besar. Ditempatkan dalam susunan dan bekerja sebagai sebuah tim, sel PV tanpa lelah dan sinergis mengubah energi yang terkandung dalam cahaya menjadi listrik yang berguna. Sayangnya, sinergi seperti itu hanya terwujud sepenuhnya ketika sel-sel PV keduanya identik satu sama lain dan bekerja di bawah radiasi yang identik (intensitas cahaya). Namun, terlalu sering, ketika dunia

nyata mengganggu tampilan kerja tim PV yang menyenangkan ini, sel-sel individual mengalami ketidakcocokan manufaktur dan tingkat naungan, kekotoran, penuaan, dan sejumlah variabel lain yang membutuhkan elektronik untuk menyelamatkan. . Elektronik pendukung dan kontrol mengelola serangkaian sel PV dengan melacak kondisi daya maksimum, dengan menghindari titik panas yang dapat menyebabkan kebakaran, kerusakan, dan drama, dan dalam beberapa kasus, dengan mengkonfigurasi ulang array dengan cepat agar lebih cocok dengan sel-sel tetangga untuk pembangkitan daya yang lebih besar. Bersamasama, susunan PV yang dirancang dengan baik dan elektronik pendukung menghasilkan daya yang substansial dan konsisten dan mengalami lebih sedikit kegagalan bencana di antara selsel PV di semua jenis sistem energi surya.

### **6.1 Desain Array PV Dasar**

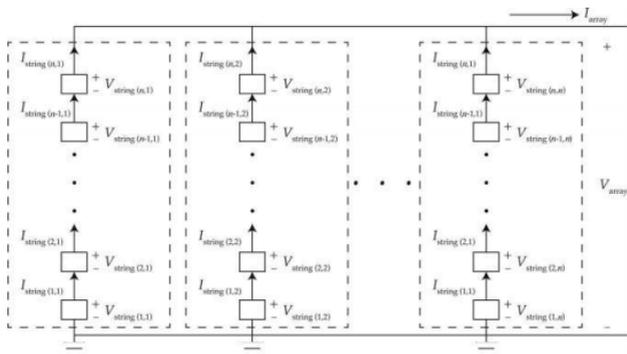
Salah satu keputusan pertama dalam merancang panel surya adalah menentukan berapa banyak sel PV yang akan ditampung panel dan bagaimana sel akan dikonfigurasi dalam panel. Panel surya tipikal terdiri dari beberapa string, masing-masing berisi sejumlah sel PV yang terhubung seri. String ini kemudian dihubungkan secara paralel satu sama lain untuk melengkapi array.

String sel PV meningkatkan tegangan output array ke tingkat yang kompatibel dengan perangkat penyimpanan energi

(misalnya, baterai). Dengan pengecualian sel gallium arsenide (GaAs) dan perovskite, sebagian besar sel PV beroperasi pada tegangan maksimum antara 0,5 dan 0,7 V. Secara teori, dimungkinkan untuk menggunakan elektronik boost converter untuk meningkatkan tegangan satu sel PV ke tingkat yang cukup untuk mendukung penyimpanan energi atau secara langsung memberi daya pada beberapa perangkat elektronik. Sayangnya, efisiensi dari pendekatan ini seringkali buruk dan mengakibatkan kerugian daya yang signifikan. Lebih lanjut, rugi-rugi daya ini hanya meningkat dengan meningkatnya kesenjangan antara tegangan sel PV dan tegangan perangkat/baterai. Jadi, kerugian yang terlibat dalam menyalakan tegangan suplai yang lebih tinggi yang diperlukan dari lebih banyak perangkat yang haus daya seperti komputer laptop akan jauh lebih besar daripada yang terkait dengan memberi daya yang lebih kecil, perangkat yang haus daya lebih sedikit. Mengatasi masalah ini dan membatasi rugi-rugi daya sehingga tidak bergantung pada tegangan suplai memerlukan konfigurasi susunan sel PV untuk menyediakan tegangan yang mendekati apa yang dibutuhkan baterai untuk diisi dan perangkat elektronik apa yang perlu berfungsi dengan baik.

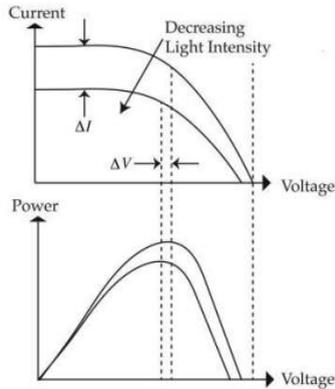
Untuk mengatasi inefisiensi yang terkait dengan pengkondisian tegangan array sel PV, sel PV dihubungkan secara seri untuk membentuk string. String menghasilkan tegangan yang merupakan jumlah dari tegangan sel dalam string (Gambar 6.1). Arus yang mengalir melalui string PV harus sama untuk semua sel dalam string. Untuk sel PV

dengan karakteristik serupa yang beroperasi di bawah kondisi pencahayaan yang sama, sambungan seri menghasilkan sedikit kehilangan daya karena karakteristik operasi dan titik daya maksimum (MPP) dari semua sel dalam string serupa.



**GAMBAR 6.1**

susunan sel PV. Di sebagian besar panel surya, sel PV pertama kali dihubungkan secara seri dan string yang dihasilkan dihubungkan secara paralel untuk membentuk array PV (array yang ditunjukkan di sini memiliki jumlah sel yang sama secara seri dan paralel, tetapi ini tidak selalu terjadi di sebagian besar panel PV). Arus yang mengalir melalui sel-sel PV dalam tali yang sama selalu sama, tetapi tegangan yang melintasi tali adalah jumlah tegangan yang melintasi sel-sel PV individu dalam tali. Arus array adalah jumlah dari semua arus string dan tegangan array adalah rata-rata dari semua tegangan string.



**GAMBAR 6.2**

Karakteristik sel PV di bawah kondisi peninaran yang berubah. Saat jumlah energi cahaya yang mencapai sel PV berkurang, semakin sedikit daya yang dihasilkan. Pada MPP, sel menghantarkan arus yang lebih kecil dan tegangan yang melewatinya lebih sedikit. Namun, pengurangan arus secara signifikan lebih besar daripada pengurangan tegangan yang muncul dengan pergeseran titik operasi.

Untungnya, tegangan sel PV tidak banyak berubah karena radiasi (intensitas cahaya) dan kondisi input berubah. Akibatnya, tegangan yang dihasilkan oleh seluruh string sedikit berfluktuasi jika semua sel terus beroperasi pada atau dekat MPP mereka ( Gambar 6.2). Sebaliknya, arus berfluktuasi jauh lebih luas sebagai akibat ketidaksesuaian karakteristik sel PV, perbedaan radiasi pada setiap sel, dan naungan, kekotoran, dan ketidakteraturan lain yang terkait dengan sel individu. Variasi tersebut dapat secara drastis mengurangi arus yang mengalir melalui string karena arus string selalu dibatasi oleh sel terlemah dalam string. Lebih lanjut, karena sel PV yang sehat beradaptasi dengan arus yang lebih kecil dan daya yang berkurang dari sel yang lemah atau berkinerja buruk dalam sebuah string, mereka dapat

menyebabkan sel yang berkinerja buruk mengembangkan tegangan negatif (yaitu, bias balik). Dalam situasi ini, sel yang berkinerja buruk mulai mengkonsumsi daya daripada menghasilkan daya, yang memperparah rugi daya yang dihasilkan dari arus yang berkurang yang telah mengalir melalui string. Bias mundur, sel yang berkinerja buruk juga rentan terhadap panas berlebih yang menyebabkan kerusakan sementara dan terkadang permanen selain menimbulkan bahaya kebakaran dan keselamatan. Menghindari "titik panas" ini dan konsekuensi lain dari sel-sel yang berkinerja buruk dalam sebuah string mengharuskan string PV dikelola menggunakan elektronik kontrol yang dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan string ketika terkena naungan, kekotoran, dan variasi ambien lainnya dalam sel. perilaku selama operasi sehari-hari.

String sel PV memberikan tegangan yang diinginkan untuk perangkat elektronik berikutnya atau sistem penyimpanan energi. Menghubungkan string PV secara paralel melengkapi fungsi string tunggal dengan meningkatkan arus yang dihasilkan dari array PV (Gambar 6.1). Arus total yang dihasilkan oleh beberapa string secara paralel hanyalah jumlah dari arus string individu, sedangkan tegangan string yang dihubungkan secara paralel kira-kira rata-rata dari semua tegangan string. Hukuman untuk string PV yang menghasilkan tegangan yang tidak serupa dengan string lain dalam array hampir tidak separah penalti saat ini yang dikenakan oleh sel PV yang berkinerja buruk dalam string karena tiga alasan: (a) voltase sel PV dan string PV tidak bervariasi sebanyak arus sel

PV (Gambar 6.2); (b) tegangan larik PV mendekati tegangan string rata-rata daripada tegangan string kasus terburuk seperti halnya dengan arus sel dalam string; dan (c) sebagian besar konverter DC-DC dapat menangani penurunan kecil pada tegangan input tanpa penurunan efisiensi yang signifikan. Untuk alasan ini, elektronik yang dirancang untuk mengelola operasi susunan PV dengan lebih baik memusatkan perhatian mereka pada mitigasi efek arus yang berperforma buruk di dalam string daripada pada tegangan yang berperforma buruk di seluruh string.

Sistem sel surya tradisional yang dipasang di atas atap atau lokasi stasioner lainnya menggunakan panel surya dengan panjang 36 cm  $\times$  15,2 cm.  $\times$  Sel PV 15,2 cm terhubung secara seri untuk mendukung output 12-V nominal dan tujuh puluh dua 15,2 cm  $\times$  Sel PV 15,2 cm secara seri untuk mendukung output nominal 24-V (Samlex Solar nd). Berdasarkan tegangan operasi tipikal 0,5 V per sel, 36 sel menyediakan 18 V yang dapat diturunkan regulasinya ke profil pengisian daya yang diperlukan baterai timbal-asam 6-sel 12-V standar. Demikian pula, 72 sel PV secara seri dapat diturunkan regulasinya untuk mendukung penyimpanan energi 24- V. Alasan mengapa susunan sel PV dirancang untuk menghasilkan tegangan lebih dari yang dibutuhkan untuk penyimpanan energi adalah untuk memperhitungkan penurunan tegangan keluaran yang disebabkan oleh pemanasan sendiri, naungan sebagian sel PV, dan efek lingkungan lainnya (PV Education 2019).

Pengisi daya surya portabel memerlukan lebih sedikit sel PV secara seri karena voltase yang lebih rendah yang mereka dukung — sekitar 5 V. String yang lebih kecil, terdiri dari delapan sel PV yang lebih kecil yang dihubungkan secara seri, lebih dari cukup untuk mendukung 3,7 V–4,2 V diperlukan untuk mengisi baterai Li-ion tunggal (Falin dan Li 2011). Jumlah sel yang lebih kecil dapat digunakan ketika konverter boost (step-up) digunakan untuk mengkondisikan tegangan array PV ke tegangan atau arus yang diperlukan untuk pengisian baterai yang optimal. String yang lebih kecil memiliki sejumlah keunggulan. Pertama, satu sel yang berkinerja buruk membahayakan kinerja sejumlah kecil sel (per string) yang mengakibatkan kerugian daya keseluruhan yang lebih rendah. Dan, karena sel PV dalam string menempati area yang jauh lebih kecil dalam string yang lebih kecil, kecil kemungkinannya bahwa satu sel akan secara signifikan lebih teduh, kotor, atau lebih terganggu daripada sel lain dalam string yang sama. Dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, di mana panel surya jauh lebih kecil daripada sistem tradisional dengan area sel PV individual yang lebih kecil, kemungkinan kinerja yang sangat buruk yang disebabkan oleh perbedaan dalam naungan, kekotoran, atau ketidakaturan lain dalam senar semakin berkurang. Namun demikian, di sistem sel surya yang menggunakan sel PV fleksibel, dapat dipakai atau lainnya, pembengkokan dan gerakan lain dalam sel PV individu dapat menghasilkan orientasi sel yang berbeda dalam string yang menghasilkan perbedaan kinerja yang serupa seperti naungan parsial dan ketidakmurnian.

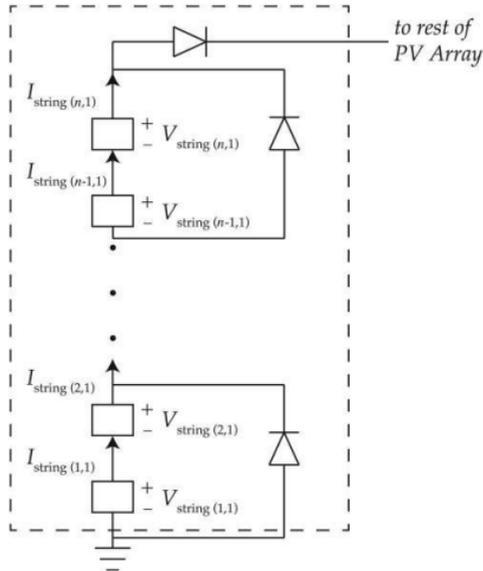
## 6.2 Manajemen Array

Banyak susunan PV yang dirancang berlebihan untuk menghasilkan tegangan nominal yang lebih besar daripada yang dibutuhkan perangkat penyimpanan energi berikutnya untuk beroperasi dengan benar. Tegangan yang lebih tinggi ini selalu dapat diturunkan ke tegangan yang tepat yang dibutuhkan oleh baterai atau perangkat penyimpanan energi lainnya melalui penggunaan buck converter. Namun, juga dimungkinkan untuk meningkatkan tegangan output dari array PV menggunakan konverter boost yang memiliki manfaat tambahan karena membutuhkan lebih sedikit sel PV secara seri. Konverter buck dan boost dibahas lebih lanjut di Bab 7.

Array PV dirancang untuk memberikan input ke boost atau buck converter (tetapi biasanya tidak keduanya). Sementara kedua jenis konverter memungkinkan beberapa fleksibilitas dalam seberapa tinggi atau seberapa rendah tegangan array PV dapat berjalan, manajemen array masih harus mengurangi efek sel yang berkinerja buruk pada produksi daya secara keseluruhan. Dioda pemblokiran dan bypass adalah bagian penting dari strategi dasar untuk mengelola sel yang berkinerja buruk. Dioda pemintas (Gambar 6.3a) digunakan untuk mencegah sel yang berperforma buruk dari menenggelamkan daya daripada memproduksinya dan menjadi hot spot yang rentan terhadap keretakan dan kerusakan fisik lainnya. Dioda bypass terhubung paralel ke sel PV sehingga jika string menyebabkan sel PV masuk ke bias

mundur, dioda masuk ke bias maju dan menghantarkan arus string yang mungkin mengalir melalui sel PV yang berkinerja buruk dan rusak. Pada t. Dalam sistem sel surya skala besar di mana string menghantarkan arus dalam jumlah yang cukup besar, dioda seringkali terlalu mahal untuk melewati sel tunggal, sehingga mereka biasanya terhubung di beberapa sel dalam sebuah string. Jika sel di substring berkinerja buruk, dioda bypass mematikan produksi daya di semua sel di substring. Dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, arus yang dihasilkan lebih kecil.

Sementara dioda bypass digunakan untuk mengelola sel PV pada tingkat sel atau substring, dioda lain, yang disebut dioda pemblokiran, beroperasi pada seluruh tingkat string (Gambar 6.3). Sementara dioda bypass dihubungkan secara paralel dengan substring tunggal atau kecil sel PV, dioda pemblokiran dihubungkan secara seri dengan seluruh string sel. Jika karena alasan apa pun, string tertentu memuat array dan mencoba untuk menenggelamkan daya daripada menghasilkannya, dioda pemblokiran dimatikan dan mencegah arus mengalir mundur ke string. Sementara dioda pemblokiran dan pemintas efektif dalam mencegah daya yang berlebihan menguras atau merusak sel yang berkinerja buruk, mereka masih merupakan elemen pasif dan dapat menghabiskan daya yang cukup besar saat melakukannya.



**GAMBAR 6.3**

Memblokir dan memotong dioda dalam susunan sel PV. Dioda bypass beroperasi secara paralel dengan sel PV tunggal atau sejumlah kecil sel PV (ditunjukkan sebagai substring dari dua sel pada gambar di atas). Jika sel PV berkinerja buruk dan menghasilkan arus yang lemah, dioda bypass akan menyala untuk mencegah sel masuk ke bias balik dan panas berlebih. Dioda pemblokiran beroperasi secara seri dengan setiap string PV dalam array dan mencegah arus mengalir mundur ke string.

Alternatif untuk memblokir dan memotong dioda telah dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari pendekatan dasar ini. Salah satu alternatif yang layak untuk penggunaan beberapa dioda dalam susunan PV untuk sistem sel surya yang dapat dipakai adalah lebih memilih koneksi paralel daripada seri sel PV. Koneksi paralel mengatasi ketidakseragaman dalam perilaku sel PV dan lebih mudah untuk dicocokkan ketika perilaku sel PV sering dan luas bervariasi. Ketika array

sel PV didominasi oleh paralel daripada koneksi seri, masalah penyeimbangan arus diminimalkan. Penurunan tegangan output dari koneksi paralel dapat menyebabkan konverter boost memiliki efisiensi keseluruhan yang lebih rendah, tetapi pengurangan efisiensi ini mungkin dapat ditoleransi mengingat konsekuensi kinerja yang lebih rendah dalam array yang berisi string yang lebih besar dengan lebih banyak sel PV yang terhubung secara seri per string.

### **6.3 Maximum Power Point Tracking**

Tidak peduli ukuran array atau kondisi operasinya, array PV yang dikelola dengan baik mencakup sirkuit dan algoritma yang menemukan titik operasi yang sesuai dengan daya maksimum atau mendekati maksimum. Daya maksimum yang sebenarnya hanya mungkin ketika sel-sel PV merespon secara identik satu sama lain dan terpapar pada kondisi penyinaran (intensitas cahaya) yang identik. Secara realistis, hanya daya mendekati maksimum yang dapat dijangkau dengan menggunakan pelacakan titik daya maksimum (MPPT). MPPT mencari dan menempatkan MPP untuk setiap sel PV, setiap string sel, atau setiap subset sel yang telah ditentukan sebelumnya dalam array PV. Tujuan MPPT adalah untuk memaksimalkan produksi daya array mengingat keterbatasan sel PV yang beroperasi di dalamnya. Berbagai macam teknik MPPT tersedia, sebagian besar dikembangkan untuk sistem sel surya yang terhubung ke jaringan (Esrasm dan Chapman 2007). Teknik mendaki bukit adalah salah satu pendekatan yang

paling populer untuk MPPT. Dalam pendekatan gangguan dan observasi (P&O) untuk mendaki bukit, tegangan operasi atau arus sel PV atau array PV dinaikkan atau diturunkan dan produk dari tegangan dan arus (yaitu, daya) dihitung. Jika daya lebih dari yang dihasilkan pada tegangan dan arus operasi asli sebelum gangguan, tegangan atau arus dinaikkan sekali lagi. Jika daya lebih kecil, tegangan atau arus kemudian diatur ke arah yang berlawanan. Efisiensi pendekatan ini dalam menemukan daya maksimum lebih dari 96% (Rawat dan Chandel tegangan operasi atau arus dari sel PV atau array PV meningkat atau menurun dan produk dari tegangan dan arus (yaitu, daya) dihitung. Jika daya lebih dari yang dihasilkan pada tegangan dan arus operasi asli sebelum gangguan, tegangan atau arus dinaikkan sekali lagi. Jika daya lebih kecil, tegangan atau arus kemudian diatur ke arah yang berlawanan. Efisiensi pendekatan ini dalam menemukan daya maksimum lebih dari 96% (Rawat dan Chandel tegangan operasi atau arus dari sel PV atau array PV meningkat atau menurun dan produk dari tegangan dan arus (yaitu, daya) dihitung. Jika daya lebih dari yang dihasilkan pada tegangan dan arus operasi asli sebelum gangguan, tegangan atau arus dinaikkan sekali lagi. Jika daya lebih kecil, tegangan atau arus kemudian diatur ke arah yang berlawanan. Efisiensi pendekatan ini dalam menemukan daya maksimum lebih dari 96% (Rawat dan Chandel 2013).

Untuk mengakomodasi kondisi pencahayaan yang berubah dengan cepat yang sering terjadi pada hari berawan sebagian atau merupakan aturan daripada pengecualian untuk sistem sel surya yang dapat dipakai, P&O adaptif mungkin lebih cocok

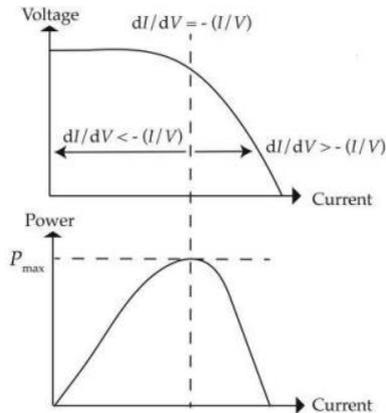
untuk MPPT. Dalam pendekatan P&O yang dimodifikasi ini, penyesuaian lebih besar ketika radiasi berubah dengan cepat untuk mempercepat laju di mana sel PV atau array menemukan MPPT. Ketika kondisi lebih stabil, perubahan gangguan dijaga agar lebih kecil untuk menghindari overshooting MPP dan pemborosan daya dan waktu dalam proses (Rawat dan Chandel 2013). Tak satu pun dari pendekatan P&O ini memungkinkan MPP ditemukan atau dihitung secara eksplisit. Untuk benar-benar menemukan dan mengetahui MPP, teknik yang dikenal sebagai algoritma konduktansi inkremental (ICA) dapat digunakan. Di ICA, rasio tegangan terhadap arus daripada produk mereka digunakan untuk mencari MPP. Menurut definisi, MPP terjadi ketika :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V} \quad (6.1)$$

Ketika  $dI/dV$  lebih besar dari  $-I/V$ , MPP berada di sebelah kanan titik operasi arus, pada arus yang lebih besar (Gambar 6.4). Ketika  $dI/dV$  kurang dari  $-I/V$ , MPP berada di sebelah kiri titik operasi arus, pada arus yang lebih kecil.

Keuntungan dari pendekatan ICA adalah setelah MPP diidentifikasi dengan jelas, titik operasi sel PV tidak perlu diganggu atau "diguncang" lagi (Lokanadham dan Bhaskar 2012). Ini mengurangi kerugian daya yang terjadi ketika sel PV atau sel tidak beroperasi pada daya maksimumnya dan juga mengurangi daya yang dikonsumsi dalam melacak MPP.

Selanjutnya, pendekatan ICA untuk MPPT berkinerja lebih baik daripada pendekatan P&O adaptif ketika kondisi pencahayaan input berubah secara dramatis dan sering.



**GAMBAR 6.4**

Metode algoritma konduktansi tambahan (ICA) untuk menemukan titik daya maksimum (MPP). Dalam metode ICA, hubungan antara turunan arus (terhadap tegangan) dibandingkan dengan rasio arus terhadap tegangan untuk menentukan arah MPP dari titik operasi saat ini.

Banyak cara yang lebih akurat untuk menemukan dan memelihara MPP dalam sel PV atau susunan sel yang tersedia. Metode digital seperti logika fuzzy dan kontrol jaringan saraf (Salah dan Ouali 2011) dan tegangan atau arus fraksional (Li, Zheng, Li, dan He 2010) memerlukan pengetahuan tentang karakteristik operasi sel PV yang dikalibrasi dan mengurangi jumlah waktu nyata, informasi dan komputasi yang diperlukan untuk menghitung MPP. Teknik semacam itu juga memiliki tingkat overhead yang tinggi dan mengkonsumsi daya yang

cukup besar, yang membuatnya lebih cocok untuk sistem tradisional yang terhubung ke jaringan daripada sistem sel surya yang lebih kecil dan dapat dipakai.

Dalam sistem sel surya portabel dan dapat dipakai, tidak hanya efisiensi dan konsumsi daya sistem MPPT yang menjadi masalah, tetapi ukuran dan berat keseluruhan sistem ikut berperan. Implementasi analog MPPT sangat menarik untuk sistem sel surya portabel dan dapat dipakai karena mereka dapat melakukan komputasi yang signifikan pada daya yang lebih rendah dan ukuran yang lebih kecil daripada banyak sistem digital yang sesuai.

MPPT yang menggunakan pendekatan korelasi riak sangat cocok dengan implementasi sederhana dan murah menggunakan sirkuit analog. Dalam korelasi riak turunan waktu daya dalam sel PV atau susunan kecil sel PV dan turunan waktu dari arus atau tegangan digunakan untuk mendorong gradien daya ke nol. Gradien daya nol menurut definisi adalah titik produksi daya maksimum. Korelasi riak hanya melibatkan gangguan kecil di sekitar MPP, sehingga memungkinkan MPP ditemukan pada kecepatan yang kompatibel dengan beradaptasi dengan berbagai kondisi input yang cepat (Esrasm et al. 2006; Eltamaly 2018). Terlepas dari bagaimana penerapannya, MPPT dapat dilakukan pada sel PV tunggal, pada sebagian kecil sel, atau pada seluruh array sel PV. Global MPPT mengabaikan MPP sel PV individu dan sebaliknya hanya melacak arus dan tegangan seluruh array (Pallavee Bhatnagar dan Nema 2013). Saat mencapai output daya lebih banyak

daripada tanpa pelacakan MPP, pendekatan MPPT ini tidak menjamin bahwa setiap sel beroperasi pada MPP-nya atau bahwa daya maksimum diekstraksi dari string tertentu atau subset sel PV lainnya dalam larik. MPPT global, meskipun ruang efisien dan mudah diterapkan, hanya satu langkah di atas tidak ada pelacakan MPP sama sekali. Di sisi lain, MPPT yang diterapkan pada setiap tingkat sel individu menjamin daya maksimum yang dihasilkan. Namun, ruang dan daya yang dikonsumsi oleh MPPT sel individual menjadi penghalang bagi sebagian besar sistem. Bagaimanapun, di sebagian besar sistem sel surya, beberapa jenis MPPT sesuai. Kebanyakan MPPT diimplementasikan pada tingkat substring daripada sel tunggal atau tingkat MPP global.

#### **6.4 Konfigurasi Ulang Array**

Di mana topologi tidak teratur terlibat seperti halnya dengan banyak sistem yang dapat dipakai, sel PV membungkuk untuk melakukan pekerjaan mereka. Membungkuk, memelintir, dan sebaliknya membengkokkan sel PV ke apa pun selain tapak datar aslinya dapat dengan cepat menciptakan kerugian daya yang signifikan dalam rangkaian yang terhubung seri yang disebabkan oleh kinerja sel pada titik operasi yang sangat berbeda. Masalah ini sebagian diringankan oleh fakta bahwa hukuman untuk mematikan senar yang dibenamkan oleh berkinerja buruk jauh lebih sedikit daripada di sistem tradisional, hanya karena lebih sedikit sel per senar. Namun, ketika kehilangan daya tetap tidak dapat diterima dalam

kondisi pengoperasian yang berbeda di seluruh rangkaian yang dapat dikenakan, mengkonfigurasi ulang susunan adalah solusi yang mungkin.

Konfigurasi ulang array (La Manna et al. 2014) memungkinkan sel PV dalam suatu sistem untuk beroperasi pada atau di dekat MPP masing-masing. Ketika sel PV dalam sebuah string memiliki perbedaan dalam titik operasi yang menyebabkan kehilangan daya yang tidak dapat diterima, koneksi sel mereka dapat dikonfigurasi ulang secara elektrik sehingga mereka beroperasi dalam string dengan sel PV lain yang lebih berpikiran sama yang perilakunya lebih dekat dengan mereka sendiri. Skema konfigurasi ulang statis memungkinkan koneksi dikonfigurasi ulang sebelum instalasi untuk mengkompensasi variasi dalam proses manufaktur. Konfigurasi ulang satu kali seperti itu tidak mengatasi atau mengelola perubahan dinamis yang disebabkan oleh naungan parsial, kekotoran, dan fluktuasi lain di lingkungan yang memengaruhi operasi sel PV.

Skema konfigurasi ulang susunan fisik dinamis menawarkan lebih banyak peluang untuk mengoptimalkan produksi daya. Skema ini memungkinkan sel PV untuk dikonfigurasi ulang dan koneksi diubah setiap saat selama penggunaan untuk mengoptimalkan produksi daya dan memungkinkan lebih banyak sel PV individu untuk beroperasi pada atau di dekat MPP mereka. Koneksi diubah melalui penggunaan sakelar berbasis transistor yang dapat menyesuaikan koneksi di seluruh array dengan cepat. Berbagai macam pendekatan konfigurasi ulang telah ditunjukkan (La Manna et al. 2014).

Umum untuk semua pendekatan konfigurasi ulang adalah bahwa mereka meningkatkan daya yang dihasilkan oleh array PV yang tunduk pada kondisi input yang sering dan banyak berubah. Peningkatan produksi daya terjadi dengan mengorbankan konsumsi daya yang meningkat dan ukuran sistem yang lebih besar yang ditimbulkan oleh penerapan sakelar perangkat keras, elektronik pelacakan daya, dan algoritma komputasi yang diperlukan untuk konfigurasi ulang yang berhasil. Implementasi khas dari konfigurasi ulang array menggunakan array statis sel PV dan bank dinamis sel PV tambahan. Sel-sel PV dari bank adaptif dialihkan ke dalam atau keluar dari susunan statis sesuai kebutuhan melalui matriks pensaklaran untuk meningkatkan produksi daya secara keseluruhan. Membuat sistem yang dapat dikonfigurasi ulang menjadi layak memerlukan perhatian untuk mengurangi kompleksitas matriks switching dan elektronik pelacakan daya dan juga mengoptimalkan algoritma MPPT dan konfigurasi ulang. Namun, sistem konfigurasi ulang array terbaik terus membutuhkan overhead yang besar, yang mungkin dapat dibenarkan untuk susunan besar sel PV yang merupakan tipikal dari instalasi tradisional tetapi menjadi penghalang untuk sistem sel surya yang dapat dipakai di semua aplikasi kecuali yang paling haus daya. Untuk sistem yang tidak harus mengkonfigurasi ulang pada kecepatan tinggi, konfigurasi ulang adaptif domain waktu (TDAR) adalah pilihan. TDAR mengkonfigurasi ulang sel PV dari waktu ke waktu daripada ruang, memungkinkan mereka untuk berkontribusi pada daya array PV hanya ketika mereka beroperasi pada MPP yang

sebanding dengan sel lain dalam array (Vaidya dan Wilson 2013). Pendekatan ini mencapai tujuan yang sama seperti konfigurasi ulang array berdasarkan matriks switching tetapi melakukannya tanpa menghabiskan ruang dan daya yang diperlukan untuk matriks semacam itu. TDAR mengkonfigurasi ulang sel PV dari waktu ke waktu daripada ruang, memungkinkan mereka untuk berkontribusi pada daya array PV hanya ketika mereka beroperasi pada MPP yang sebanding dengan sel lain dalam array (Vaidya dan Wilson 2013). Pendekatan ini mencapai tujuan yang sama seperti konfigurasi ulang array berdasarkan matriks switching tetapi melakukannya tanpa menghabiskan ruang dan daya yang diperlukan untuk matriks semacam itu. TDAR mengkonfigurasi ulang sel PV dari waktu ke waktu daripada ruang, memungkinkan mereka untuk berkontribusi pada daya array PV hanya ketika mereka beroperasi pada MPP yang sebanding dengan sel lain dalam array (Vaidya dan Wilson 2013). Pendekatan ini mencapai tujuan yang sama seperti konfigurasi ulang array berdasarkan matriks switching tetapi melakukannya tanpa menghabiskan ruang dan daya yang diperlukan untuk matriks semacam itu.

## **6.5 Ringkasan**

Sejumlah besar upaya penelitian dan pengembangan telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja panel surya dalam sistem tradisional. Ruang desain di sekitar desain array PV, konfigurasi ulang array, mitigasi sel berkinerja buruk yang

lemah, dan MPPT telah dieksplorasi dengan baik. Sistem sel surya yang dapat dipakai dapat dan akan mendapat manfaat dari upaya ini. dapat mendukung sistem sel surya yang dapat dipakai yang berkinerja lebih baik dan lebih murah. Jika sebagian besar daya yang dikonsumsi oleh semua perangkat yang dapat dikenakan dan portabel dihitung pada tegangan suplai kurang dari 1,5 V (daripada 3,3 atau 5,0 V yang dibutuhkan sebagian besar perangkat yang dapat dikenakan dan ponsel cerdas), sistem PV dapat beroperasi secara efisien pada string yang mengandung hanya satu atau dua sel. Desain menggunakan string yang lebih kecil ini bisa sangat menyederhanakan strategi manajemen array dan elektronik yang diperlukan untuk mendukung strategi tersebut. Meskipun tidak realistis untuk berpikir bahwa semua perangkat yang dapat dikenakan dan portabel dapat diskalakan ke tegangan suplai rendah ini, banyak yang dapat—terutama mikroprosesor yang haus daya.

## Referensi

Eltamaly, Ali M. 2018. "Performance of MPPT Techniques of Photovoltaic Systems under Normal and Partial Shading Conditions." In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 115–161. New York, NY: Elsevier.

Esrām, Trishan, and Patrick L. Chapman. 2007. "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22 (2): 439–449.

Esrām, Trishan, Jonathan W. Kimball, Philip T. Krein, Patrick L. Chapman, and Pallab Midya. 2006. "Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control." *IEEE Transactions on Power Electronics* 21 (5): 1282–1291.

Falin, Jeff, and Wang Li. 2011. *A Boost-Topology Battery Charger Powered from a Solar Panel*. Texas Instruments Inc. <http://www.ti.com/lit/an/slyt424/slyt424.pdf>.

La Manna, Damiano, Vincenzo Li Vigni, Eleonora Riva Sanseverino, Vincenzo Di Dio, and Pietro Romano. 2014.

“Reconfigurable Electrical Interconnection Strategies for Photovoltaic Arrays: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33: 412–426.

Li, Weichen, Yuzhen Zheng, Wuhua Li, and Xiangning He. 2010. “A Smart and Simple PV Charger for Portable Applications.” In 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2080–2084. IEEE.

Lokanadham, Metta, and Kurba Vijaya Bhaskar. 2012. “Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System.” *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 2 (2): 1420–1424.

Pallavee Bhatnagar, A., and B. R. K. Nema. 2013. “Conventional and Global Maximum Power Point Tracking Techniques in Photovoltaic Applications: A Review.” *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5 (3): 032701. <https://doi.org/10.1063/1.4803524>.

PV Education. 2019. “Module Circuit Design.” <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>.

Rawat, Rahul, and S. Chandel. 2013. "Hill Climbing Techniques for Tracking Maximum Power Point in Solar Photovoltaic Systems-a Review." *International Journal of Sustainable Development and Green Economics* 2: 90–95.

Salah, Chokri Ben, and Mohamed Ouali. 2011. "Comparison of Fuzzy Logic and Neural Network in Maximum Power Point Tracker for PV Systems." *Electric Power Systems Research* 81 (1): 43–50.

Samlex Solar. n.d. "The Difference Between Solar Cell, Module & Array." Accessed July 15, 2019. <https://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cellmodule-array.aspx>.

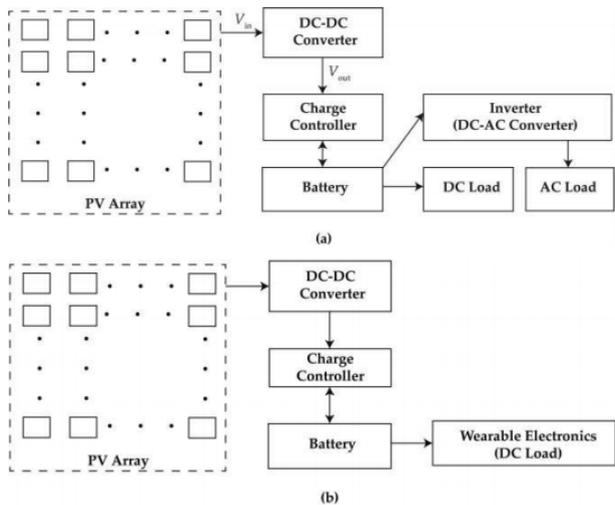
Vaidya, Vaibhav, and Denise Wilson. 2013. "Maximum Power Tracking in Solar Cell Arrays Using Time-Based Reconfiguration." *Renewable Energy* 50: 74–81

## BAB 7 PENYIMPANAN ENERGI

---

Di sebagian besar sistem sel surya, susunan sel PV yang mengubah cahaya menjadi energi listrik tidak secara langsung menghasilkan tegangan atau arus yang kompatibel dengan perangkat elektronik dan peralatan yang mengandalkannya untuk mendapatkan daya. Jadi, salah satu tugas pertama yang harus dilakukan sistem sel surya untuk susunan PV adalah mengkondisikan keluaran susunan agar lebih sesuai dengan persyaratan beban elektronik berikutnya. Dalam banyak sistem sel surya, pengkondisian seperti itu melibatkan dua tahap (Gambar 7.1a). Tahap pertama menyesuaikan tegangan DC yang dihasilkan oleh array PV ke tegangan DC lain yang cukup untuk mengisi baterai atau perangkat penyimpanan energi lainnya. Tahap konversi DC-DC ini mungkin juga melibatkan pembatasan arus yang mengalir ke baterai untuk mencegah pengisian yang berlebihan atau penyimpanan daya hingga arus yang cukup tersedia untuk mengisi baterai secara optimal. Pada tahap ini, baterai dapat mensuplai perangkat elektronik dan peralatan yang berjalan pada DC. Untuk elektronik lainnya, tahap kedua dari banyak sistem sel surya mengubah output DC dari konverter DC-DC menjadi AC. Konversi ini memungkinkan sistem sel surya untuk menggerakkan peralatan atau perangkat AC apa pun yang tidak dapat didukung langsung oleh baterai. Sementara

beberapa sistem sel surya tidak memiliki baterai dan memasok daya langsung ke jaringan listrik, sistem mandiri dan semakin banyak sistem perumahan menyediakan baterai untuk penyimpanan energi. Dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, tidak diperlukan inverter DC-AC karena hampir semua perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan beroperasi pada DC (Gambar 7.1b). Dengan pengecualian tidak memerlukan inverter DC-AC, struktur umum sistem sel surya yang dapat dipakai sama dengan banyak sistem sel surya yang lebih besar. Setelah konversi DCDC, elektronik pengontrol muatan tambahan mengatur dan menyesuaikan arus dan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan baterai selama tahap pengisian yang berbeda. Karena baterai memiliki persyaratan pengisian yang ketat, beberapa sistem penyimpanan energi hibrid (HESS) menggunakan perangkat penyimpan energi tambahan, seperti superkapasitor, untuk memungkinkan baterai mengisi daya lebih dekat ke profil optimalnya. Kemajuan dalam bagaimana output array PV dikondisikan dan bagaimana energi dan daya disimpan terus memperluas perangkat, aplikasi, dan skenario di mana sistem sel surya memberikan solusi yang layak untuk permintaan energi.



**GAMBAR 7.1**  
 desain sistem PV. (a) sistem PV yang dirancang untuk memberi daya pada perangkat dan peralatan DC dan AC dan (b) sistem PV untuk perangkat yang dapat dikenakan dan portabel yang dirancang untuk hanya memberi daya pada elektronik DC.

## 7.1 Konversi DC-DC

Bahkan setelah array sel PV dirancang dan dioptimalkan untuk aplikasi tertentu, daya output array, tegangan, dan arus masih bervariasi dengan penyinaran cahaya di lingkungan sekitar dan dengan ketidakcocokan manufaktur, naungan, penuaan, kekotoran, dan ketidakteraturan lainnya. yang menyebabkan karakteristik operasi sel PV individu berbeda satu sama lain. Sementara pendekatan manajemen array dibahas dalam Bab 6 dapat memungkinkan sel PV untuk beroperasi secara efisien dalam menanggapi berbagai masukan, kebanyakan baterai

bukan penggemar berat variasi tersebut dan fluktuasi arus dan tegangan yang dihasilkan. Sirkuit konversi DC-DC mengelola fluktuasi ini dengan menstabilkan tegangan.

Tiga pendekatan mendasar untuk konversi DC-DC tersedia untuk integrasi ke dalam sistem sel surya (Tabel 7.1). Yang pertama mengasumsikan bahwa tegangan yang disediakan oleh array PV akan selalu lebih rendah dari tegangan yang dibutuhkan oleh baterai yang sedang diisi. Dalam hal ini, fungsi DC-DC konversi akan selalu untuk meningkatkan atau meningkatkan tegangan output array PV menggunakan konverter boost. Pendekatan kedua mengasumsikan bahwa tegangan larik PV akan selalu lebih tinggi dari tegangan pengisian baterai yang diinginkan. Konverter buck memberikan pengurangan tegangan selama konversi DC-DC. Dan, akhirnya ketika rentang tegangan input dari susunan PV tumpang tindih dengan rentang tegangan pengisian baterai yang diinginkan, konverter buck-boost adalah pilihan yang tepat untuk konversi DC-DC.

**TABEL 7.1**  
Tiga Jenis Konverter DC-DC

Kondisi	Konversi DC-DC
$V_{di} \leq V_{di\ luar}$	Dorongan
$V_{di} > V_{di\ luar}$	uang
$V_{di} \leq V_{di\ luar}$ atau $V_{di} > V_{di\ luar}$	Meningkatkan uang

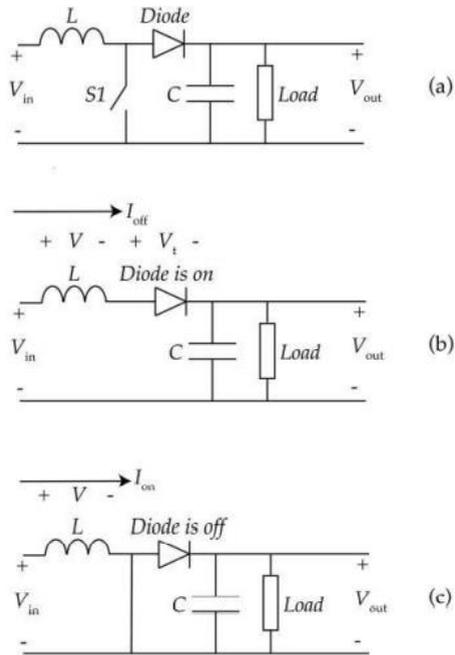
Kerugian daya yang melekat pada masing-masing dari ketiga jenis konverter DC-DC ini merupakan pertimbangan penting dalam desain sistem sel surya yang dapat dipakai. Kehilangan daya cenderung paling rendah dan efisiensi tertinggi di antara konverter boost, dengan efisiensi mendekati 99% dalam implementasi tegangan tinggi/daya tinggi. Konverter buck cenderung menunjukkan efisiensi yang lebih rendah daripada konverter boost secara keseluruhan meskipun keduanya mengalami lebih banyak kerugian pada daya input yang lebih rendah. Dan konverter buck-boost memiliki efisiensi yang bahkan lebih rendah daripada konverter buck dan dapat mengalami kerugian yang lebih besar pada daya input tinggi dan rendah (Graditi, Colonnese, dan Femia 2010).

Sistem sel surya yang dapat dipakai cenderung memberi daya pada perangkat elektronik dengan persyaratan tegangan yang jauh lebih rendah daripada sistem atap atau sistem skala besar lainnya. Kesenjangan antara tegangan array PV dan tegangan pengisian baterai jauh lebih kecil dalam sistem yang dapat dikenakan. Untuk alasan ini, konverter boost sering kali merupakan pilihan terbaik untuk sistem ini. Namun, mengingat daya yang sangat bervariasi yang dihasilkan oleh array PV yang dapat dipakai serta berbagai macam beban yang mungkin didukung oleh sistem PV yang dapat dipakai, pilihan terbaik dari jenis dan desain konverter DCDC harus dioptimalkan pada sistem demi system dasar.

### **7.1.1 Peningkatan Konversi**

Konverter boost dapat dibuat dengan sedikitnya empat komponen (saklar, induktor, dioda, dan kapasitor), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.2a. Sakelar (S1) sering diimplementasikan menggunakan transistor efek medan semikonduktor oksida logam (MOSFET). Ketika S1 mati, sakelar dapat dimodelkan sebagai rangkaian terbuka (Gambar 7.2b) dan ketika menyala, dapat dimodelkan sebagai korsleting (Gambar 7.2c).

Agar konverter boost beroperasi dengan benar, S1 dihidupkan dan dimatikan secara berkala dengan siklus kerja  $D$ , frekuensi  $f$  (dalam Hz), dan periode  $T$  (dalam detik).



**GAMBAR 7.2**  
Desain konverter boost dasar.

sama dengan  $1/f$ . Siklus tugas ( $D$ ) mewakili berapa lama  $S1$  relatif terhadap periode  $T$ :

$$D = \frac{\text{On Time}}{T} \quad (7.1)$$

Ketika konverter boost pada awalnya dihidupkan, tegangan output  $V_{di}$  luar membutuhkan beberapa waktu untuk mencapai nilai kondisi mapan yang merupakan fungsi dari input tegangan ( $V_{di}$ ). Untuk memahami apa yang terjadi selama respons sementara ini, asumsikan bahwa  $V_{di}$  luar awalnya nol. Asumsikan juga bahwa rangkaian dimulai dengan tegangan input tiba-tiba meningkat dari nol ke  $V_{di}$  dan sakelar  $S_1$  adalah mati. Dalam situasi ini (Gambar 7.2b), arus yang disuplai oleh  $V_{di}$  mengalir melalui induktor dan dioda dan mengisi kapasitor. Jika dioda diasumsikan menjadi ideal, tegangan output  $V_{di}$  luar membebaskan ke nilai  $V_{di}$ . Dalam prakteknya, bagaimanapun, beberapa penurunan tegangan dialami di dioda dan setelah tegangan awal periode di mana  $S_1$  adalah mati,  $V_{di}$  luar kurang dari  $V_{di}$  dengan jumlah yang sama dengan tiga tegangan dioda ( $V_t$ )

$$V_{out} = V_{in} - V_t \quad (7.2)$$

Setelah beberapa waktu  $(1 - D) \times T$  detik, sakelar  $S_1$  menyala dan rangkaian beroperasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.2c. Tegangan melintasi dioda berkurang menjadi nilai negatif sama dengan  $0 - V_{di}$  luar yang memaksanya untuk mematikan, dengan demikian melakukan arus nol. Dalam situasi ini, tegangan keluaran  $V_{di}$  luar tidak memiliki jalur arus yang tersedia ke ground dan kapasitor pada output menjaga tegangan output tetap tetap di  $V_{di} - V_t$ . Dalam praktiknya, baterai yang sedang diisi oleh konverter boost menghadirkan resistansi beban ke konverter boost yang dilepaskan kapasitor

keluaran dari waktu ke waktu. Untuk meminimalkan debit ini, kapasitor biasanya besar yang menyebabkan penurunan tegangan output dapat diabaikan. Pada saat yang sama, di sisi kiri konverter boost, tegangan melintasi induktor berubah tiba-tiba dari nol ke  $V_{di}$ . Arus melalui induktor apa pun tidak dapat berubah secara tiba-tiba. Sebaliknya, arus induktor mulai secara bertahap meningkat sesuai dengan hubungan yang mengatur antara arus dan tegangan pada induktor:

$$V = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (7.3)$$

dimana  $V$  adalah tegangan pada induktor dalam volt (V),  $i$  adalah arus yang melaluinya dalam ampere (A), dan  $L$  adalah induktansi dalam Henry (H). Sedangkan  $S_1$  adalah di, arus induktor berusaha meningkat dari nol ke arus hubung singkat sel PV atau larik PV yang menyediakan input ke konverter boost. Secara desain, arus hubung singkat ini tidak pernah tercapai karena akan merusak atau menghancurkan induktor, sakelar, atau sel PV. Untuk mencegah kerusakan tersebut, periode  $T$  pendek dan frekuensinya  $f$  cepat untuk membatasi arus maksimum yang mengalir melalui salah satu komponen rangkaian. Diberikan periode tertentu  $T$  dan di waktu  $D \times T$ , arus induktor maksimum dapat ditemukan sebagai:

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{L} (D \times T) \quad (7.4)$$

Pada akhir di siklus  $S_1$ , arus induktor telah mencapai maksimum nilai  $I_{max}$  dan sakelar kembali ke mati posisi (Gambar 7.2b). Karena arus induktor tidak dapat berubah secara tiba-tiba, arus induktor tetap sementara pada maksimumnya. nilai itu saat sakelar  $S_1$  berputar mati. Tapi, ketika saklar berubah mati, tidak ada tempat untuk mengalirkan arus—situasi yang menakutkan dan mustahil bagi elektron di sirkuit. Untuk mengatasi krisis, tegangan melintasi dioda adalah dipaksa ke tegangan ambangnya  $V_t$ , sehingga menyebabkannya menyala. Setelah dioda menyala, kapasitor keluaran mulai mengisi sekali lagi, menyebabkan tegangan melintasinya untuk meningkat dari nilai yang dicapai selama sakelar pertama siklus ing ( $V_{in} - V_t$ ). Selama siklus switching berikutnya ( $S_1$  mati lalu  $S_{1in}$ ), proses ini berulang dengan sendirinya, menyediakan mekanisme yang  $V_{out}$  dapat terus meningkat ke nilai yang secara signifikan melebihi tegangan input.

Berapa tegangan output yang secara efektif “didorong” oleh konverter boost ditentukan oleh siklus kerja duty  $D$  dan periode  $T$ . Pada keadaan tunak, tegangan keluaran mencapai nilai maksimum

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \sim \frac{1}{1-D} \quad (7.5)$$

Hubungan ini dapat diturunkan dengan mengakui bahwa, pada keadaan tunak, perubahan arus induktor selama periode

off konverter boost harus sama dan berlawanan dengan perubahan arus induktor selama period *on*:

$$\Delta I_{on} = -\Delta I_{off} \quad (7.6)$$

Perubahan arus selama di negara ( $\Delta$ sayadi) ditemukan dengan memanipulasi persamaan yang mengatur induktor dari bentuk turunan (Persamaan 7.3) ke bentuk integral

$$\Delta I_{on} = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} V dt \quad (7.7)$$

Batas integrasi dimulai pada untuko = 0 detik dan berakhir pada untuk 1 = D × T detik saat tegangan melintasi induktor ketika sakelar S1 berada di di posisi (Gambar 7.2b) adalah secara sederhana  $V_{in}$ . Mensubstitusi ke Persamaan 7.7 dan menyelesaikan integral memberikan:

$$\Delta I_{on} = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_{in} dt = \frac{DT}{L} V_{in} \quad (7.8)$$

Ketika saklarnya mati, Persamaan 7.7 dapat diterapkan lagi untuk menentukan perubahan arus induktor yang dihasilkan. Karena sakelar mati pada waktunyat = D × T, batas integrasi

sekarang dimulai pada untuko =  $D \times T$  detik dan berakhir pada untuk1 =  $T$  detik. Itu tegangan melintasi induktor ketika sakelar berada di mati negara adalah:

$$V = V_{in} - (V_{out} + V_t) \quad (7.9)$$

Integrating gives:

$$\Delta I_{off} = \frac{1}{L} \int_{DT}^T [V_{in} - (V_{out} + V_t)] dt = \frac{T}{L} [V_{in} - (V_{out} + V_t)](1 - D) \quad (7.10)$$

Mengatur perubahan arus  $\Delta$ sayamati selama mati bagian dari siklus sama dengan negatif dari perubahan arus selama di bagian dari siklus  $\Delta$ sayadi (Persamaan 7.6) untuk mempertahankan kondisi tunak memungkinkan output tegangan yang akan ditentukan:

$$\frac{T}{L} [V_{in} - (V_{out} + V_t)](1 - D) = -\frac{DT}{L} V_{in} \quad (7.11)$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{1 - D} - V_t \quad (7.12)$$

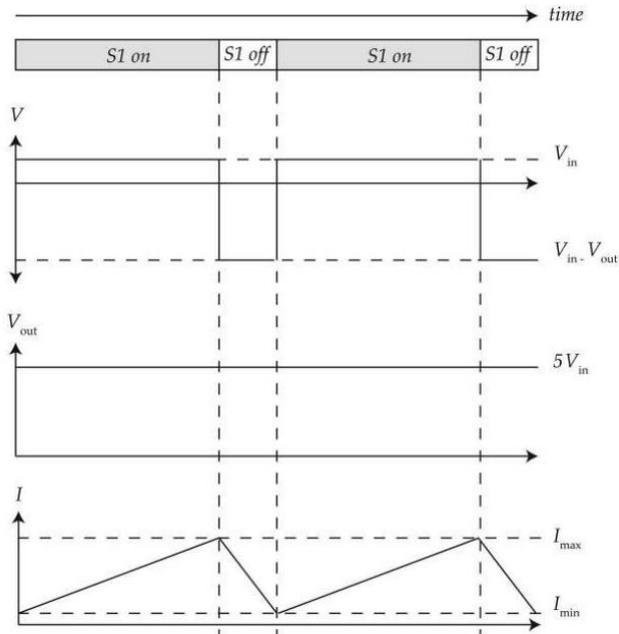
Untuk nilai keuntungan yang tinggi ( $V_{keluar} / V_{di}$ ), tegangan ambang  $V_{untuk}$  kecil dibandingkan dengan suku pertama di sisi kanan persamaan, dan keuntungan yang diberikan dengan Persamaan 7.5 adalah perkiraan yang baik dari keuntungan yang sebenarnya. Namun, untuk aplikasi sel surya yang dapat dipakai, di mana celah antara tegangan input dan output

konverter boost biasanya lebih kecil daripada di sistem sel surya lainnya, tegangan ambang dioda tidak selalu dapat diabaikan dan ekspresi untuk tegangan output diberikan dalam Persamaan 7.12 lebih tepat.

Contoh: Pertimbangkan konverter boost dengan input 2 V, tegangan output yang diinginkan 10 V, dan arus induktor maksimum yang diizinkan sebesar 1 A dengan induktor 1 mH. Berdasarkan kendala ini, keuntungan yang diinginkan adalah 10/2 atau 5, yang membutuhkan siklus kerja sekitar 0,8 atau 80%. Jika arus maksimum induktor adalah 1 A, periode jam yang diperlukan adalah 0,625 msec, sesuai dengan frekuensi 1,6 kHz. Respon kondisi tunak dari konverter boost ini ditunjukkan secara kualitatif dalam Gambar 7.3. Tegangan keluaran konverter boost awalnya pada 0 V dan dengan cepat meningkat, setelah beberapa siklus clock menjadi 10 V. Sekali pada 10 V, siklus kerja mempertahankan tegangan pada 10 V. Arus induktor meningkat saat sakelar S1 di dan berkurang saat sakelar S1 adalah mati. Dalam prakteknya, tegangan output menurun ketika S1 adalah di, karena terdapat hambatan beban paralel dengan kapasitor pada tegangan keluaran. Karena kapasitor biasanya besar dan jamnya relatif cepat, bagaimanapun, debitnya relatif kecil.

Ekspresi untuk penguatan yang diberikan dalam Persamaan 7.5 dan 7.12 mengasumsikan bahwa energi yang disimpan oleh induktor saat sakelar S1 adalah di tidak sepenuhnya habis (dilepas) saat sakelar S1 diputar mati. Asumsi ini berarti bahwa arus akan terus mengalir selama keduanya di dan mati siklus

sakelar (yaitu, operasi berkelanjutan). Dalam beberapa kondisi, terutama yang melibatkan beban ringan, arus dalam induktor dapat mencapai nol sebelum sakelar beralih darimati untuk di. Ini menghasilkan mode operasi terputusputus yang memperumit ekspresi untuk penguatan dan menyebabkannya tidak hanya bergantung pada siklus kerja. D tetapi juga nilai induktor  $L$ , periode jam  $T$ , dan hambatan beban  $RL$  yang beroperasi secara paralel dengan kapasitansi beban  $C$ . Karena kerumitannya, riak keluaran lebih tinggi, dan lebih rendah efisiensi, operasi terputus-putus dihindari dalam desain konverter boost untuk sistem sel surya (Nelson 1986).



**GAMBAR 7.3**

Meningkatkan perilaku konverter. Arus induktor ( $SAYA$ ), tegangan induktor ( $V$ ), dan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) dari konverter boost dalam operasi berkelanjutan (di mana induktor tidak sepenuhnya diizinkan untuk melepaskan antara siklus) ditampilkan. Tegangan keluaran adalah kelipatan dari tegangan masukan yang tergantung pada siklus kerja sakelar.

Apakah konverter boost beroperasi secara terus-menerus atau terputus-putus, keseluruhan kebaikan (yaitu, figur manfaat) dari konverter boost biasanya diwakili dikirim oleh efisiensinya :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (7.13)$$

dimana daya yang hilang pada boost converter itu sendiri timbul dari berbagai sumber yang berada di luar cakupan pembahasan ini. Meskipun efisiensi mendekati 99% dimungkinkan pada konverter boost tegangan tinggi/daya tinggi, efisiensi turun drastis untuk beban ringan dengan efisiensi maksimum sekitar 90% untuk arus beban kurang dari 1 A (Davis 2018). Tingkatkan efisiensi konverter juga turun sebagai gain konverter ( $V_{keluar} / V_{di}$ ) meningkat. Keuntungan tinggi biasanya tidak menjadi masalah dengan sistem sel surya yang dapat dipakai. Misalnya, banyak tenaga surya pengisi baterai hanya berisi delapan sel PV secara seri, mampu menghasilkan tegangan maksimum sekitar 5,6 V (pada 0,7 V per sel). Konverter boost membutuhkan penguatan kurang dari 3 untuk menyalakan komputer laptop 11,1-V (Falın dan Li 2011). Desain konverter boost dasar, meskipun sederhana, mudah diterapkan, dan berbiaya rendah, memiliki beberapa kelemahan. Sebuah kapasitor besar diperlukan pada output untuk menjaga tegangan output stabil dan riak (yaitu, perubahan periodik) pada arus output signifikan. Selanjutnya, pada instalasi surya konvensional, di mana tegangan keluaran cenderung tinggi, desain konverter boost dasar menempatkan tegangan tegangan yang besar pada sakelar MOSFET. Sementara perhatian terakhir ini minimal untuk desain tegangan keluaran yang lebih rendah dari sistem sel surya yang dapat dipakai, arus riak yang besar dapat mengganggu pengisian baterai yang optimal dan kapasitor yang lebih besar dapat meningkatkan biaya dan ukuran keseluruhan sistem sel surya. Konverter boost interleaved (Babba et al. 2018) dapat

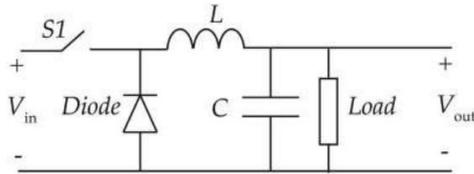
mengurangi riak pada daya dan arus keluaran dengan menggunakan dua konverter boost yang beroperasi di luar fase satu sama lain. Pendekatan interleaved ini memungkinkan tegangan output diisi untuk jangka waktu yang lebih lama selama setiap siklus clock, sehingga memberikan lebih sedikit waktu untuk melepaskannya. Waktu pengosongan yang lebih rendah juga memungkinkan kapasitor yang lebih kecil digunakan pada output konverter boost. Desain konverter boost lainnya, yang mencakup isolasi (output dari input), desain interleaved yang disempurnakan, dan pendekatan push-pull (Li dan He 2010; Babba et al. 2018),

Meskipun umumnya kurang efisien daripada konverter boost, konverter buck kadang-kadang digunakan dalam sistem PV ketika tegangan output dari array PV lebih tinggi dari tegangan pengisian yang diinginkan dari baterai berikutnya di sebagian besar kondisi operasi (yaitu, sebagian besar waktu). Konverter buck mengurangi tegangan output dari array PV ke tegangan baterai yang dibutuhkan. Seperti halnya boost converter, duty cycle dari buck converter dapat diatur untuk menjaga kestabilan tegangan output ketika kondisi input ke array PV berfluktuasi.

### 7.1.2 Konversi Buck (Langkah Turun)

Desain konverter uang dasar ditunjukkan pada: Gambar 7.4. Ketika sakelar S1 berada didi keadaan, dioda mati, tidak ada arus yang mengalir melalui dioda sebagai hasilnya, dan tegangan input memasok arus ke induktor yang selanjutnya mengisi kapasitor beban C. Sementara sakelar tetap ada di, arus induktor terus meningkat dengan jumlah yang dapat dihitung dari dasar hubungan induktor:

$$V_{in} - V_{out} = V_L = L \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \quad (7.14)$$



**FIGURE 7.4**  
Basic buck converter design.

dimana  $\Delta$  untuk adalah waktu di mana sakelar S1 berada di dan terkait dengan siklus tugas D dan titik T sebagai  $D \times T$ . Ketika saklar berubah dari di untuk mati, arus induktor mulai berkurang dengan jumlah yang sama dengan kenaikan arus ketika sakelar di karena konservasi kekuasaan. Dalam istilah energi, energi yang tersimpan dalam induktor saat sakelar adalah di transfer ke output konverter ketika sakelar dalam

keadaan mati. Analisis rangkaian yang serupa dengan konverter boost dapat diterapkan pada rangkaian konverter buck dasar untuk: tentukan keuntungan konverter buck:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} \sim D \quad (7.15)$$

Mirip dengan konverter boost, ekspresi di atas mengasumsikan bahwa arus induktor kontinu (yaitu, tidak semua energi induktor dilepaskan saat sakelar mati) dan kapasitor pada output cukup besar. tegangan keluaran ( $V_{di}$  luar) tidak terdegradasi secara signifikan selama mati bagian dari siklus switching. Konverter buck dasar memiliki kelemahan yang serupa ke konverter boost dasar dan dapat ditingkatkan dengan desain yang lebih kompleks yang mirip dengan yang digunakan untuk meningkatkan konverter boost. Terlepas dari kesamaannya, bagaimanapun, konverter buck umumnya kurang efisien daripada konverter boost, dengan efisiensi maksimum berkisar sekitar 97% untuk aplikasi daya tinggi dan, seperti konverter boost, mengalami penurunan efisiensi pada beban yang lebih ringan dan tegangan input yang lebih tinggi ( Graditi, Colonnese, dan Femia 2010).

### **7.1.3 Konversi Buck-Boost**

Pada prinsipnya, konverter buck-boost dapat digunakan dalam sistem sel surya yang dapat dipakai untuk mengakomodasi voltase input apa pun dengan menaikkan voltase rendah ke voltase baterai yang diperlukan dan menekuk atau melemahkan voltase tinggi. Namun, efisiensi konverter buck-boost menurun pada tegangan tinggi dan rendah. Hal ini membuat kinerja konverter buck-boost tidak sesuai dengan daya keluaran dan tegangan yang sangat bervariasi yang dihasilkan oleh sistem surya yang dapat dipakai. Dengan demikian, pilihan terbaik dalam sistem tata surya yang dapat dipakai adalah sering menggunakan konverter boost dan merancang susunan PV sehingga tegangan input akan selalu lebih kecil dari tegangan output yang diinginkan.

## **7.2 Penyimpanan Energi**

Tujuan desain utama konverter DC-DC dalam sistem sel surya portabel atau wearable adalah untuk memberikan tegangan dan arus yang disesuaikan dengan kebutuhan perangkat penyimpanan energi (misalnya, baterai, paket baterai) yang mengikuti arus DC. -DC converter dalam arsitektur sistem (Gambar 7.1). Sementara berbagai teknologi baterai tersedia untuk mendukung penyimpanan energi dalam sistem PV, sebagian besar elektronik konsumen dan perangkat wearable lainnya hanya mengandalkan satu dari tiga bahan dan

teknologi: nikel kadmium (NiCd), nikel metal hidrida (NiMH) , atau lithium-ion (Li-ion). Sebaliknya, ketika membutuhkan penyimpanan energi, sistem sel surya stasioner secara historis mengandalkan baterai timbal-asam.

### **7.2.1 Baterai**

Salah satu indikator yang lebih umum tentang kebaikan baterai, baik yang dapat diisi ulang atau sekali pakai, adalah kapasitasnya, yang biasanya dinyatakan dalam ampere-jam (Ah) atau miliampere-jam (mAh). Sayangnya, ada sejumlah kelemahan dalam menggunakan kapasitas untuk mengidentifikasi kualitas baterai. Pertama, kapasitas dalam Ah atau mAh berbicara tentang jumlah arus yang dapat dialirkan selama periode waktu tertentu. Idealnya, baterai 20 mAh akan menghasilkan 20 mA selama 1 jam atau 10 mA selama 2 jam. Tetapi tidak ada skenario yang berbicara tentang kapasitas energi baterai yang sebenarnya. Untuk ini, kapasitas harus dikalikan dengan tegangan nominal baterai. Tegangan nominal, pada gilirannya, tergantung pada bahan dan teknologi baterai. Misalnya, baterai NiCd memiliki tegangan sel nominal 1,2 V. Dengan kapasitas 10 mAh, baterai dapat mengalirkan 0,012 Wh. Sebaliknya, 0,036 Wh. Selain itu, kapasitas biasanya menurun dengan meningkatnya permintaan saat ini dan melakukannya secara berbeda tergantung pada jenis dan ukuran baterai serta faktor lingkungan termasuk suhu. Untuk perangkat portabel dan perangkat yang dapat dikenakan, masalah ini biasanya

ditangani selama desain perangkat elektronik dan bukan selama desain sistem pengisian, apakah sistem pengisian ini didasarkan pada AC, DC, surya, atau sumber energi lainnya.

Yang lebih memprihatinkan untuk perangkat yang dapat dikenakan dan portabel adalah ukuran dan berat baterai, karena baterai seringkali merupakan komponen yang paling merepotkan dalam perangkat ini. Energi spesifik dan kepadatan energi memberikan wawasan tentang betapa rumitnya (atau tidak) baterai dalam aplikasi yang dapat dikenakan atau portabel. Energi spesifik, diukur dalam watt-jam per kilogram (Wh/ kg) memberikan perkiraan berapa berat baterai (tidak termasuk elektronik yang diperlukan untuk mengontrol pengisian dan memastikan keamanan). Untuk mengukur ukuran relatif, densitas energi memberikan ukuran energi nominal yang dihasilkan per satuan volume (Wh/L). Parameter ini sebagian besar merupakan fungsi dari baterai material dan teknologi dengan Li-ion terdepan dalam perangkat portabel dan dpt dipakai modern (Tabel 7.2).

**TABEL 7.2**

Ukuran dan Volume Baterai untuk Sistem Sel Surya

Bahan	Spesifik Energi	Energi Massa jenis	Kesesuaian Ukuran/Berat untuk Perangkat yang Dapat Dipakai dan Portabel
timbal-asam	35–40 Wh/kg	80–90 Wh/L	Miskin
Litium-Ion (Li-ion)	90 Wh/kg	210 Wh/L	Luar biasa
Nikel Kadmium (NiCd)	50 Wh/kg	140 Wh/L	Baik
Nikel Logam Hidrida (NiMH)	55 Wh/kg	180 Wh/L	Baik

*Sumber:* Simpson (2011) dan May, Davidson, dan Monahov (2018).

Ada lebih banyak kebaikan baterai daripada seberapa besar dan beratnya. Hingga pertengahan hingga akhir 1990-an, NiCd adalah satu-satunya teknologi baterai yang sesuai untuk perangkat elektronik portabel. Baterai ini secara teratur digunakan di radio darurat, kamera video, dan peralatan listrik. Pada awal tahun 1950, kemajuan dalam teknologi baterai NiCd mengarah pada paket baterai NiCd yang disegel, dan kemajuan lebih lanjut dalam teknologi menghasilkan versi baterai NiCd dengan kapasitas sangat tinggi. Baterai NiCd memiliki voltase sel yang relatif rendah (1,2 V), dan beberapa baterai harus ditumpuk secara seri untuk memberi daya pada sebagian besar perangkat portabel dan perangkat yang dapat dipakai. Tegangan sel rendah ini juga lebih kompatibel dengan output sel PV. Namun, efek memori, di mana baterai harus benar-benar kosong untuk mempertahankan kapasitas penuhnya, serta self-discharge yang tinggi saat baterai tidak digunakan, batasi penggunaannya dalam sistem sel surya yang mulus dan dapat dipakai. Keuntungan unik dari baterai NiCd dan paket baterai, yang berharga dalam perangkat elektronik tertentu, adalah bahwa tegangan sel tetap sekitar 1,2 V sampai tepat sebelum baterai mati atau tidak dapat digunakan. Perilaku ini sangat kontras dengan kebanyakan baterai lain yang tegangan selnya menurun secara bertahap selama pengosongan.

Dengan 1,2 V per sel yang sama, baterai NiMH memiliki kapasitas lebih tinggi daripada NiCd dan efek memori yang lebih sedikit. Baterai ini juga ramah lingkungan dan beroperasi pada rentang suhu yang lebar dengan kapasitas lebih besar

daripada NiCd. Namun, baterai NiMH sulit diisi, rentan terhadap panas berlebih, sensitif terhadap pengisian berlebih, dan seperti NiCd, cepat habis saat tidak digunakan. Kerugian ini biasanya menghilangkan baterai NiMH dari pertimbangan di sebagian besar perangkat yang dapat dikenakan dan portabel.

Lithium telah lama dianggap sebagai alternatif yang menarik untuk baterai NiCd dan NiMH. Namun, terlepas dari kenyataan bahwa pekerjaan pada baterai lithium dimulai pada awal 1900-an, masalah keamanan mencegah teknologi menjadi matang selama hampir satu abad. Akhirnya, pada 1990-an, teknologi baterai lithium dalam bentuk kimia lithium-ion (Li-ion) menjadi cukup layak dan aman untuk bersaing dengan NiCd. Sejak tahun 1990-an, teknologi baterai berbasis lithium telah cukup maju untuk menjadi teknologi baterai yang tumbuh paling cepat dan paling menjanjikan untuk masa depan yang memberi daya pada perangkat portabel. Litium sangat menarik untuk perangkat yang dapat dikenakan dan aplikasi seluler lainnya karena sebagai logam paling ringan, lithium menawarkan kepadatan energi tertinggi, baterai paling ringan, dan potensi elektrokimia tertinggi di antara para pesaingnya. Karena litium tidak stabil, alternatif nonlogam (Li-ion) dengan kontrol siklus pengisian dan pengosongan yang dikelola dengan baik telah memungkinkan keunggulan litium dimanfaatkan dengan aman. Sel baterai li-ion juga memiliki voltase sel tunggal yang tinggi (sekitar 3,6 V), yang membuat baterai sel tunggal layak untuk sistem sel surya yang dapat dipakai.

Dalam pertimbangan energi spesifik, kepadatan energi (Tabel 7.2), dan fitur serta kekurangan lain dari masing-masing teknologi baterai ini (Tabel 7.3), timbal-asam muncul sebagai pilihan yang paling dapat diandalkan untuk sistem PV standalone stasioner, sedangkan Li-ion sering menjadi pilihan terbaik untuk sistem sel surya mobile dan dpt dipakai. Mengelola pengisian baterai ini dengan susunan PV relatif mudah untuk baterai timbal-asam tetapi semakin rumit untuk Li-ion dan teknologi baterai baru lainnya.

Sementara susunan PV secara inheren tidak cocok untuk menghantarkan arus dan tegangan yang stabil karena perubahan pencahayaan dan kondisi susunan, sirkuit kontrol dapat dirancang menjadi tata surya yang dapat dipakai untuk meminimalkan dampak variabilitas tinggi tersebut pada kinerja baterai. Sirkuit kontrol ini dan strategi yang sesuai dapat bervariasi menurut jenis baterai, karena teknologi baterai yang berbeda memiliki kebutuhan yang berbeda untuk pengisian daya yang optimal.

**TABEL 7.3** Baterai untuk Sistem PV Mandiri

Bahan	timbal-asam	Li-ion	NiCd	NiMH
Nominal tegangan per sel	2 V/sel	3,6 V/sel	1.2 V/sel	1.2 V/sel
Pengisian ulang <small>seumur hidup....</small>	200–300 siklus	500–1.000 siklus	1.500 siklus	300–500 siklus
Pelepasan diri <small>menitak.</small>	5%/bulan	5-10%/bulan	15-20%/bulan	20-30%/bulan
Pengisian waktu.	5–8 jam	1-2 jam	4–10 jam	12–36 jam
Biaya	\$100–\$200/kWh	\$300–\$1.000/kWh	\$300–\$600/kWh	\$300–\$600/kWh
Lingkungan toksisitas	Tinggi	Rendah	Tinggi	Rendah
Keuntungan	Sangat murah	Ringan, kecil	Sel stabil tegangan	Lingkungan ramah
Kekurangan	Berat, besar	Bisa tidak stabil, dan alami sumber ekstraksi adalah sulit	Mendemonstrasikan tinggi diri debit dan memiliki memori efek	Menunjukkan tinggi pelepasan diri dan sulit untuk diisi

*Sumber:* Simpson (2011) dan Battery University (2017a, b, 2018).

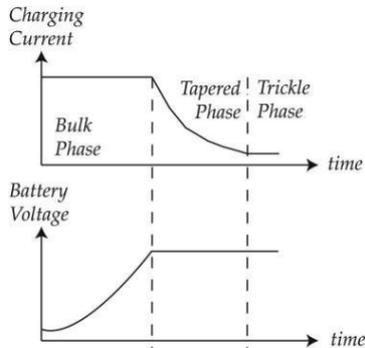
<sup>a</sup>Sebuah Jumlah siklus pengisian ulang saat baterai menurun hingga 80% dari kapasitas aslinya.

<sup>b</sup>Termasuk menguras energi yang ditimbulkan oleh sirkuit keselamatan.

<sup>c</sup>Diberikan sebagai waktu pengisian yang lambat; waktu pengisian cepat membutuhkan sirkuit yang lebih kompleks dan menimbulkan bahaya keamanan.

Sebagai titik tolak untuk memahami bagaimana baterai diisi dengan baik, pertimbangkan baterai timbal-asam di mana banyak sistem sel surya stasioner telah dirancang. Baterai timbal-asam adalah teknologi yang relatif murah, kuat, andal, dan matang. Energi spesifiknya lebih rendah daripada baterai NiCd, NiMH, dan Li-ion (Tabel 7.2), tetapi biayanya yang rendah membuat teknologi ini tetap berfungsi untuk skala utilitas dan sistem penyimpanan energi skala besar lainnya. Teknologi baterai asam timbal (Pb) itu sendiri dianggap lebih berkelanjutan daripada teknologi pesaing dalam hal ketersediaan energi sumber daya, dan sebagian besar baterai timbal

didaur ulang, yang selanjutnya meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi dampak akhir masa pakainya terhadap lingkungan. dan kesehatan ekosistem (Mei, Davidson, dan Monahov 2018). Namun, baterai Pb mengandung logam berat beracun dan secara signifikan lebih berat daripada teknologi NiMH, NiCd, dan Li-ion, baterai ini tidak dapat digunakan di sebagian besar aplikasi PV yang dapat dipakai. Namun disediakan untuk jumlah besar mengisi baterai. Setelah tegangan baterai mencapai nilai yang ditentukan sebelumnya, arus pengisian memasuki amerung fase pengisian di mana ia secara bertahap menurun sambil menahan tegangan baterai konstan. Setelah beberapa saat ketika baterai terisi penuh, tegangan pengisian dikurangi atau dihilangkan untuk menghindari kerusakan baterai melalui pemanasan yang berlebihan atau kehilangan elektrolit. Pada saat ini, baterai masuk keberhamburan atau fase mengambang di mana hanya sejumlah kecil arus tetesan yang mengalir ke baterai, cukup untuk mengimbangi perilaku pengosongan otomatisnya. Mengapung pengisian termasuk pengisian daya menetes tetapi juga menambahkan perlindungan tambahan untuk menghindari pengisian yang berlebihan dan kerusakan selanjutnya pada baterai (Ross 2003).



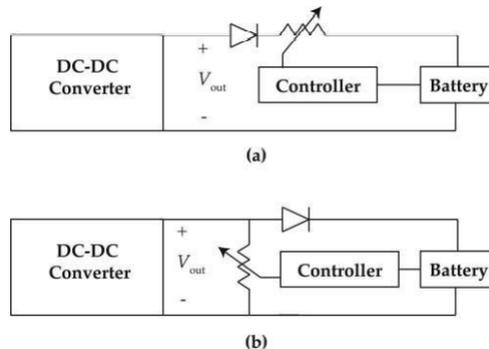
**GAMBAR 7.5**

Tiga fase dasar pengisian baterai. Baterai isi ulang standar seperti timbal-asam pertama kali diisi menggunakan arus konstan (fase curah). Ketika tegangan tertentu tercapai, pengontrol pengisian mempertahankan tegangan konstan dan arus melalui baterai turun saat baterai terus diisi (fase meruncing). Ketika baterai terisi penuh, pengontrol pengisian terus menyuntikkan sejumlah kecil arus ke dalam baterai untuk mengimbangi pengosongan otomatis baterai (fase tetesan).

Tantangan yang terlibat dalam mengadaptasi sistem sel surya ke tiga fase dasar ini tidak sepele. Seperti yang telah dibahas pada bagian sebelumnya, duty cycle dari boost atau buck converter dapat diatur untuk mengontrol input tegangan ke baterai, tetapi tegangan tersebut harus diubah menjadi arus untuk beradaptasi dengan ketiga fase pengisian baterai ini. Dua desain dasar dapat digunakan untuk mengatur arus pengisian (Gambar 7.6). Dalam kedua desain, dioda digunakan untuk mencegah arus mengalir mundur dari baterai ke konverter DC-DC dan array PV. Pengisi daya baterai juga dapat berisi regulator seri (Gambar 7.6a) yang berperilaku sebagai resistansi variabel secara seri dengan output dari array PV atau konverter DC-DC, mengurangi atau meningkatkan arus ke

baterai dengan menambah atau mengurangi resistansi seri. Atau, sebagai alternatif, regulator shunt (Gambar 7.6b) dapat digunakan untuk mengalihkan arus berlebih yang mengalir keluar dari susunan PV atau konverter DC-DC, dengan jumlah arus yang dialihkan ditentukan oleh pengontrol. Sayangnya, menerapkan regulator shunt atau seri ini sebagai resistor variabel menggunakan resistor atau transistor sering menghabiskan daya dalam jumlah besar dan tidak praktis di banyak sistem sel surya yang dapat dipakai. Sebagai gantinya, transistor, yang diimplementasikan sebagai sakelar, dapat dioperasikan pada siklus tugas yang berbeda untuk menetapkan arus rata-rata ke dalam baterai yang sedekat mungkin dengan arus pengisian optimal untuk baterai, baik dalam jumlah besar, meruncing, atau menetes/mengambang. fase pengisian. Selain menyesuaikan siklus kerja shunt atau regulasi seri, pengontrol juga dirancang untuk menghentikan pengisian baterai atau untuk mempertahankan hanya sedikit muatan setelah baterai terisi penuh (Ross 2003). Sayangnya, baterai timbal-asam hampir seluruhnya tidak praktis untuk sistem sel surya yang dapat dipakai. Dan, alternatif praktis untuk timbal-asam (Li-ion, NiCd, NiMH) yang memberi daya paling dapat dipakai, portabel, atau perangkat elektronik seluler memiliki kebutuhan pengisian daya yang lebih kompleks. Misalnya, baterai Li-ion, saat menggunakan strategi pengisian arus konstan/tegangan konstan (cc-cv) yang serupa dengan yang digunakan dalam baterai timbal-asam, memiliki beberapa kebutuhan khusus. Tegangan baterai Li-ion sering dibatasi atau dibatasi pada tegangan yang kurang dari

tegangan maksimum atau saturasi baterai. Membatasi tegangan baterai dengan cara ini mencegah pengisian ulang penuh, sering kali membatasi pengisian sekitar 85% dari kapasitas maksimumnya. Manfaat dari pendekatan ini adalah mencegah baterai dari tekanan berlebih dan mempertahankan masa pakainya (yaitu, siklus pengisian ulang). Selain itu, sifat baterai Li-ion yang tidak stabil memerlukan sirkuit perlindungan khusus untuk menghentikan atau menyesuaikan pengisian daya saat suhu naik terlalu jauh di atas suhu sekitar.



**GAMBAR 7.6**

Arsitektur pengontrol muatan dasar. Arus dapat dikurangi dengan (a) resistor seri atau (b) resistor shunt untuk mempertahankan arus yang lebih konstan selama pengisian. Sayangnya, kedua arsitektur tersebut mengakibatkan hilangnya daya saat mengatur arus dengan cara ini.

Baterai berbasis nikel (misalnya, NiCd, NiMH) tidak menggunakan pendekatan arus konstan, tegangan konstan

(cc-cv) ini untuk pengisian baterai. Sebaliknya, dalam skenario pengisian yang ideal, arus konstan diperbolehkan untuk meningkatkan tegangan secara bebas. Muatan penuh terdeteksi ketika peningkatan suhu tertentu terdeteksi (kurang akurat) atau ketika perubahan tertentu dalam kenaikan tegangan atau tanda tegangan diidentifikasi (lebih akurat). Seperti halnya timbal-asam, ketika muatan penuh terdeteksi, baterai dialihkan ke mode pengisian daya menetes atau mengambang untuk menghindari pengisian yang berlebihan dan untuk mengimbangi pemakaian (Reddy 2011).

Secara umum, baterai adalah cara yang murah untuk menyimpan energi (dibandingkan dengan cara nonkimia untuk menyimpan energi) dan memiliki tingkat self-discharge rendah yang memungkinkan mereka untuk menahan biaya mereka untuk waktu yang lama di bawah nol atau beban ringan. Baterai isi ulang mengandalkan beban sedang untuk mempertahankan kapasitas dan kinerja pemakaian dan memerlukan sumber energi yang stabil pada input untuk mengisi daya dengan baik tanpa mengorbankan masa pakai baterai.

Sementara baterai adalah standar emas dalam menyimpan energi dalam jangka waktu yang lama, mereka memiliki kelemahan. Beban berat pada keluaran baterai memerlukan semburan daya yang singkat dan arus yang tinggi yang dapat menyebabkan penurunan kapasitas dan waktu pengosongan yang drastis. Di banyak sistem sel surya, keterbatasan kepadatan daya baterai, terlepas dari kepadatan energinya,

dapat membatasi kegunaannya sebagai perangkat penyimpanan energi. Misalnya baterai timbal-asam dapat menghasilkan 35–40Wh/kg berat baterai, tetapi memiliki kepadatan daya hanya 10–20 W/kg (Komite Sistem Tenaga/Energi Tentara, Dewan Sains dan Teknologi Angkatan Darat, dan Dewan Riset Nasional 2004). Ini berarti bahwa baterai 1 kg dapat menghasilkan daya sesaat maksimum hanya 10–20 W. Namun, banyak sistem sel surya skala besar sering digunakan untuk memberi daya pada motor, kendaraan listrik, dan perangkat lain yang memerlukan arus terputus-putus yang tinggi. Kasus terburuk, baterai tidak dapat menyediakan arus ini sama sekali karena keterbatasan kepadatan daya. Kasus terbaik, kapasitas baterai terganggu oleh permintaan arus yang begitu tinggi, yang menyebabkan waktu pengosongan yang lebih pendek dan tidak diinginkan serta masa manfaat yang lebih pendek.

Di sisi lain baterai, fluktuasi yang tidak stabil pada sumber energi yang digunakan untuk mengisi ulang baterai dapat mengganggu efektivitas pengisian. Paling-paling, fluktuasi tersebut menghasilkan perilaku pengisian yang tidak sesuai dengan kebutuhan baterai dan juga mengurangi masa pakai baterai yang diukur dalam jumlah siklus pengisian ulang. Paling buruk, profil isi ulang yang buruk dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai itu sendiri. Banyak sistem sel surya stasioner besar yang paling menderita dari fluktuasi beban baterai yang disebabkan oleh jumlah, jenis, dan perilaku perangkat yang terhubung ke sistem. Sebaliknya, sistem sel surya yang dapat dipakai menderita lebih sedikit

dari variasi beban yang besar dan lebih banyak dari fluktuasi energi cahaya input dan daya listrik yang diberikan ke baterai.

### **7.2.2 Superkapasitor**

Teknologi superkapasitor memiliki potensi untuk mengurangi ketidaksesuaian antara profil pengisian stabil yang dibutuhkan baterai dan tegangan dan arus tidak stabil yang sering disediakan oleh susunan PV. Sementara baterai bergantung pada kimia untuk menyimpan energi, superkapasitor mengandalkan medan listrik untuk menyimpan energi. Energi disimpan melalui pemisahan muatan negatif dan positif ke dua pelat konduktif yang terpisah. Kedua pelat dipisahkan oleh bahan dielektrik atau isolasi, yang mencegah muatan melintasi celah di antara pelat.

Kapasitor tradisional seringkali terbatas pada nilai kurang dari satu Farad, tetapi superkapasitor dapat diproduksi untuk menghasilkan ribuan Farad per gram, ribuan siklus pengisian daya, dan kepadatan daya lebih dari 100.000 Wh/ kg (Sharma, Arora, dan Tripathi 2019) . Superkapasitor juga dapat diisi dengan sangat cepat dibandingkan dengan baterai tanpa banyak konsekuensi negatif dari pengisian cepat yang dialami baterai (Battery University 2019). Namun, superkapasitor bukanlah pilihan praktis untuk menggantikan baterai, karena harganya lebih mahal daripada baterai konvensional. Biaya superkapasitor sekitar \$1.000/kWh sedangkan baterai timbal-asam dan Li-ion masing-masing hanya seharga \$100 dan

\$300/kWh (Battery University 2017a). Untuk ekonomi alasan saja, maka, superkapasitor tidak mungkin pernah sepenuhnya menggantikan baterai. Superkapasitor juga memiliki tingkat self-discharge jauh lebih tinggi daripada baterai, dengan debit awal terukur dalam jam dan debit sekunder terjadi dalam urutan hari (Kowal et al. 2011). Terlepas dari kelemahan ini, teknologi superkapasitor dapat dan telah digunakan untuk melengkapi teknologi baterai dalam sistem penyimpanan energi hibrida (HESS). Dalam HESS ini, konverter DC-DC dua arah digunakan untuk memungkinkan array PV untuk mengisi baterai, superkapasitor, atau keduanya untuk menggerakkan beban DC yang terkait dengan banyak perangkat elektronik. Superkapasitor sering ditempatkan secara paralel dengan baterai untuk memasok peningkatan arus dan daya ke beban keluaran sesuai kebutuhan.

Sementara sistem sel surya yang dapat dipakai pada umumnya tidak memberi daya pada beban DC yang berat atau beban yang rentan terhadap lonjakan arus atau daya tinggi sementara, mereka mengalami variabilitas yang sangat tinggi dalam iradiasi input. Cahaya yang mengenai sistem sel surya yang dapat dipakai dapat bervariasi dari sinar matahari langsung berenergi tinggi hingga pencahayaan buatan tidak langsung dan, pada platform bergerak, dapat bervariasi sesering detik hingga detik. Tujuan umum, sistem sel surya yang dapat dipakai yang dirancang untuk memberi daya pada berbagai perangkat konsumen dapat memperoleh manfaat yang signifikan dari HESS yang melengkapi penyimpanan baterai dengan perangkat penyimpanan energi alternatif

seperti superkapasitor. Tanpa bentuk penyimpanan energi alternatif, sistem ini akan terpaksa membuang daya yang tidak memenuhi persyaratan baterai atau dapat menyebabkan baterai mencapai akhir masa pakainya sebelum waktunya.

### **7.3 Ringkasan**

Output dari array PV umumnya tidak cukup untuk memberikan daya langsung ke perangkat elektronik dan peralatan. Seperti banyak bentuk energi terbarukan, tenaga surya yang dihasilkan dari sel dan susunan PV tidak konsisten dan tidak selalu dapat diprediksi. Bahkan ketika dioperasikan pada titik daya maksimumnya (MPP), array PV menghasilkan arus yang turun drastis dengan penurunan iradiasi (yaitu, cahaya input). Sementara tegangan array PV tidak berubah hampir sebanyak arus array PV, ia masih mengalami fluktuasi saat MPP bergeser dengan perubahan kondisi input. Untuk mengakomodasi variabilitas ini dan menyediakan daya yang stabil untuk elektronik dalam sistem sel surya yang dapat dipakai, output tegangan dari susunan PV harus terlebih dahulu disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan catu daya elektronik. Ini dilakukan melalui penggunaan dorongan, uang, atau konverter buck-boost yang mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang lebih diinginkan. Karakteristik input-output dari konverter DC-DC sering disesuaikan untuk mempertahankan tegangan output yang hampir konstan dan stabil. Setelah tegangan stabil, arus dari susunan PV dan konverter DC-DC disesuaikan untuk

memenuhi kebutuhan perangkat penyimpan energi dalam sistem. Penyesuaian arus dapat dilakukan melalui regulator shunt atau seri, tetapi rugi daya menggunakan pendekatan ini dapat menjadi signifikan. Sebagai alternatif, superkapasitor dan perangkat penyimpan energi lainnya dapat digunakan untuk melengkapi baterai agar lebih mendekati profil pengisian ideal dan mengurangi jumlah daya yang pada akhirnya dihamburkan atau dibuang untuk mempertahankan profil ini.

## Referensi

Babba, S. E., G. El Murr, F. Mohamed, and S. Pamuri. 2018. "Overview of Boost Converters for Photovoltaic Systems." *Journal of Power and Energy Engineering* 6: 16–31

Battery University. 2017a. "BU-1006: Cost of Mobile and Renewable Power." [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_1006\\_cost\\_of\\_mobile\\_power](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1006_cost_of_mobile_power).

Battery University. 2017b. "What's the Best Battery?" [https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_battery](https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery).

Battery University. 2018. "BU-802b: What Does Elevated Self Discharge Do?" [https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating\\_self\\_discharge](https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge).

Battery University. 2019. "BU-209: How Does a Supercapacitor Work." April 17, 2019. [https://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor).

Committee on Soldier Power/Energy Systems, Board on Army Science and Technology, and National Research Council. 2004. Meeting the Energy Needs of Future Warriors. Vol. Appendix C. Washington D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11065>.

Davis, Nick. 2018. "High Efficiencies at Light Loads: A Voltage Boost Converter from Texas Instruments – News." April 12, 2018. <https://www.allaboutcircuits.com/news/high-efficiencies-at-light-loads-voltage-boost-converter-Texas-Instruments/>.

Falin, Jeff, and Wang Li. 2011. A Boost-Topology Battery Charger Powered from a Solar Panel. Texas Instruments Inc. <http://www.ti.com/lit/an/slyt424/slyt424.pdf>.

Glavin, M. E., and W. G. Hurley. 2012. "Optimisation of a Photovoltaic Battery Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System." Solar Energy 86 (10): 3009–3020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.005>.

Graditi, G., D. Colonnese, and N. Femia. 2010. "Efficiency and Reliability Comparison of DCDC Converters for Single Phase

Grid Connected Photovoltaic Inverters.” In Proc IEEE SPEEDAM, 140–147.

Kollimalla, S. K., M. K. Mishra, and N. L. Narasamma. 2014. “Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System.” IEEE Transactions on Sustainable Energy 5 (4): 1137–1144. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2336896>.

Kowal, Julia, Esin Avaroglu, Fahmi Chamekh, Armands Šenfels, Tjark Thien, Dhanny Wijaya, and Dirk Uwe Sauer. 2011. “Detailed Analysis of the SelfDischarge of Supercapacitors.” Journal of Power Sources 196 (1): 573–579

Li, W., and X. He. 2010. “Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters.” IEEE Transactions on Industrial Electronics 4: 1239–1250

Ma, Tao, Hongxing Yang, and Lin Lu. 2015. “Development of Hybrid Battery– Supercapacitor Energy Storage for Remote Area Renewable Energy Systems.” Applied Energy 153: 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.008>.

May, Geoffrey J., Alistair Davidson, and Boris Monahov. 2018. "Lead Batteries for Utility Energy Storage: A Review." *Journal of Energy Storage* 15 (February): 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.

Nelson, Carl. 1986. "LT1070 Design Manual: Application Note 19." *Linear Technology*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/applicationnotes/an19fc.pdf>

Ongaro, F., S. Saggini, and P. Mattavelli. 2012. "Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network." *IEEE Transactions on Power Electronics* 27 (9): 3944–3952. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2189022>.

Reddy, Thomas B. 2011. *Linden's Handbook of Batteries*. Vol. 4. New York: McGraw-Hill.

Ross, J. Neil. 2003. "System Electronics." In *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Sharma, Kriti, Anmol Arora, and S. K. Tripathi. 2019. "Review of Supercapacitors: Materials and Devices." *Journal of Energy Storage* 21: 801–825.

Simpson, Chester. 2011. "Characteristics of Rechargeable Batteries." Texas Instruments Literature Number SNVA533. <http://www.ti.com/lit/an/snva533/snva533.pdf>.

Zhou, H., T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone. 2011. "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications." *IEEE Transactions on Power Electronics* 26 (3): 923–930. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2095040>

## **BAB 8 TEKNOLOGI YANG DAPAT DIPAKAI DAN PORTABEL**

---

Perangkat elektronik yang dibawa oleh individu dalam masyarakat yang paham teknologi sangat banyak, beragam, dan haus akan kekuasaan. Semakin banyak, perangkat portabel tujuan umum seperti komputer laptop, tablet, dan smartphone tidak mampu bertahan dari waktu yang mereka habiskan jauh dari stopkontak atau stasiun pengisian stasioner lainnya. Seiring berkembangnya bank daya portabel untuk mengakomodasi harapan akan pengisian ulang yang nyaman untuk komputer portabel, telepon, dan perangkat serupa, mereka juga meningkatkan beban lingkungan yang diberikan baterai pada pasokan sumber daya alam global yang sudah terbatas. Meskipun sering kali jauh lebih haus daya daripada portabel untuk keperluan umum, perangkat yang dapat dikenakan tetap menambah permintaan energi seluler ini. Sistem sel surya tradisional berusaha untuk memasok daya dalam jumlah besar sambil menggantikan sumber listrik yang tidak terbarukan. Dengan demikian, mereka memainkan peran penting dalam membatasi polusi udara dan air, emisi gas rumah kaca, dan biaya lingkungan lainnya yang terkait dengan batu bara, gas alam, dan energi tak terbarukan lainnya. Sebaliknya, sistem sel surya yang dapat dipakai tidak

bertugas menghasilkan daya dalam jumlah besar. Sebaliknya, fokus desain utama mereka adalah memberikan daya yang lebih andal, nyaman, dan konsisten kepada pengguna sambil juga mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh proliferasi baterai. Di masa depan, mereka juga dapat membuka pintu untuk perangkat yang dapat dikenakan dan portabel yang saat ini tidak dapat digunakan karena keterbatasan ketersediaan daya portabel.

### **8.1 Ponsel**

Ponsel, khususnya smartphone, akan terus ada di mana-mana selama bertahun-tahun yang akan datang. Pada tahun 2021, Cisco Systems memperkirakan bahwa lebih banyak orang di dunia akan menggunakan ponsel daripada yang memiliki rekening bank atau akses ke air mengalir (Franklin 2017). Pada 2019, 94% orang dewasa di ekonomi maju memiliki ponsel, sementara 83% di negara berkembang memilikinya.

Sebagian besar ponsel ini adalah ponsel cerdas dengan 76% dan 45% orang masing-masing memiliki keajaiban ponsel ini di negara maju dan berkembang (Pew Research Center 2019a). Ponsel cerdas tidak hanya lebih banyak digunakan daripada ponsel tradisional tetapi juga merupakan perangkat elektronik seluler yang paling umum dimiliki di planet ini (Pew Research Center 2019b). Karena fitur-fiturnya yang disempurnakan dan konektivitas penggunaannya, smartphone ini mengkonsumsi

daya yang jauh lebih besar daripada ponsel bergaya flip tradisional.

Terlepas dari jenis ponsel yang mereka miliki, sebagian besar konsumen mengisi daya ponsel mereka setidaknya sekali sehari dan beberapa di kota-kota besar seperti New York dan Philadelphia melakukannya lebih dari dua kali sehari (Veloxity 2017). Konsisten dengan tingkat penggunaan ini, permintaan energi harian untuk pengguna smartphone pada umumnya diperkirakan dalam Tabel 8.1 untuk beberapa model ponsel cerdas dari empat pabrikan yang berbeda dan satu model dari masing-masing dari empat pabrikan ponsel flip tradisional. Perkiraan permintaan energi diberikan dalam watt-jam per hari (Wh/hari) dan asumsikan bahwa telepon diisi ulang penuh sekali per hari dan bahwa peringkat watt-jam (Wh) setiap baterai dapat diperkirakan sebagai produk dari amperenya yang diterbitkan. jam (Ah) ( $1.000 \times \text{mAh}$ ) dan tegangan baterai berbasis lithium standar (3,7 V). Perkiraan permintaan energi harian sangat bervariasi bahkan di antara ponsel yang dibuat oleh produsen yang sama. Misalnya, model Apple iPhone yang berbeda mengkonsumsi antara 6,35 dan 11,74 Wh/hari.

**TABEL 8.1**

## Permintaan Energi Ponsel

Smartphone	Kapasitas Baterai (mAh)			Permintaan Energi Harian (Wh) <sup>Setelah</sup>		
	min.	Berarti	Maks.	min.	Berarti	Maks.
<i>Smartphone</i>						
Apple iPhone	1.715	2.092	3.174	6,35	7,74	11,74
Motorola Moto	3.760	4.380	5.000	13,91	16,21	18,50
Satu ditambah	3.000	3.333	3.700	11,10	12,33	13,69
Samsung Galaxy	1.900	2,892	3.600	7,03	10,70	13,32
Rata-rata		3.174			11,75	
<i>Telepon Seluler (Balik) Tradisional</i>						
Konvoi		1.300			4,81	
Samsung		1.000			3,70	
LG		950			3,52	
Razer		780			2,89	
Rata-rata		1.008			3,73	

Sumber: Rioja (2019) dan Grush (2019).

<sup>Setelah</sup> Asumsikan pengguna mengisi penuh ponsel sekali sehari dan baterainya adalah lithium yang dapat diisi ulang dengan voltase sel 3,7 V.

## 8.2 Portabel Lainnya

Smartphone bukan satu-satunya perangkat yang dibawa oleh banyak orang untuk konektivitas dan komputasi tujuan umum. Misalnya, lebih dari separuh orang dewasa di Amerika Serikat memiliki tablet (Statista 2019), lebih dari 70% memiliki komputer laptop, hampir 20% memiliki pembaca e-book, dan 40% memiliki pemutar MP3 (Pew Research Pusat 2015). Di seluruh dunia, kepemilikan komputer pribadi mendekati 50% dengan komputer laptop mendominasi komputer desktop (Statista 2018). Meskipun kepemilikan dan penggunaan perangkat portabel lainnya ini mungkin tidak ada di mana-mana seperti halnya ponsel, sebagian besar perangkat komputasi portabel mengurangi penggunaan dengan

mengonsumsi daya yang jauh lebih besar daripada ponsel. Permintaan energi untuk beberapa portabel populer diperkirakan dalam Tabel 8.2 dengan mengambil rasio 90% kapasitas baterai (inwatt-jam) terhadap masa pakai baterai seperti yang dilaporkan dari pengujian pihak ketiga. Sebagian besar perangkat portabel tidak sepenuhnya kosong, tetapi mati atau tidur ketika sekitar 10% dari baterai tersisa. Dengan demikian, masa pakai baterai hanya mencakup 90% daripada 100% dari total kapasitas baterai. Seperti yang diperkirakan dalam Tabel 8.2, penggunaan energi rata-rata selama masa pakai baterai dalam watt-jam per jam sama dengan konsumsi daya rata-rata (dalam watt).

**TABEL 8.2**

Permintaan Energi Perangkat Komputasi Portabel

<b>Alat</b>	<b>Baterai Kapasitas (Wh)</b>	<b>Baterai Hidup (h)</b>	<b>Energi Permintaan.....Ke/Jam)</b>
<i>Komputer Laptop</i>			
Lenovo Thinkpad T480	24	17	1.3
HP Envy X2	25	14	1.6
Dell XPS 13 9370	52	12	4.0
Apple MacBook Pro (15 inci)	84	12	6.3
<i>Komputer Tablet</i>			
Apple iPad Pro (10,5 inci)	30	14	2.1
Buku Yoga Lenovo	34	9	3.8
Samsung Galaxy Tab S3	23	9	2.6
Asus ZenPad 3S 10	18	8	2.3
Microsoft Surface Pro	45	6	7.5
<i>Pemutar MP3</i>			
Apple iPad Sentuh	3.4	40	0,085
Jam Klip SanDisk	1.1	18	0,061
Sony Walkman NW-WS413	1.4	12	0.12

*Sumber:* Osborne (2017), Reisinger (2019), dan Tabari (2019).

Permintaan energi diperkirakan sebagai rasio 90% kapasitas baterai terhadap masa pakai baterai, dinyatakan dalam Wh/jam, dan kira-kira sama dengan konsumsi daya rata-rata dalam watt.

E-reader juga merupakan perangkat portabel yang populer, meskipun penjualan terus menurun (Statista nd). Perangkat ini memiliki kapasitas baterai dan permintaan energi yang sama selama penggunaan berkelanjutan seperti jenis perangkat komputasi portabel lainnya. Misalnya, model terbaru dari ereader Kindle terlaris, Kindle Paperwhite buatan Amazon memiliki kapasitas baterai 1.420 mAh (5,3 Wh dengan asumsi tegangan baterai 3,7) dan memiliki masa pakai baterai yang

diantisipasi 6 minggu pada 30 menit /hari (setara dengan 21 jam penggunaan terus menerus) dengan Wi-Fi dinonaktifkan. Jumlah ini merupakan perkiraan permintaan energi 0,25 Wh/jam (yaitu, konsumsi daya rata-rata 0,25 W) saat perangkat sedang digunakan. Hal ini tidak hanya menempatkan e-reader pada tingkat konsumsi daya rata-rata yang jauh lebih rendah daripada komputer laptop, penggunaan perangkat yang lebih rendah terkait dengan e-reader sama dengan kebutuhan energi harian.

### **8.3 Perangkat yang Dapat Dipakai**

Perangkat yang dapat dikenakan datang dalam berbagai bentuk, ukuran, dan fungsi dan dijual di seluruh dunia. Pasar untuk teknologi yang dapat dikenakan diproyeksikan akan tumbuh menjadi lebih dari \$70 miliar pada tahun 2022 (Grand View Research 2016) dengan Amerika Utara menyumbang hampir 50% dari pendapatan teknologi yang dapat dikenakan. Kebugaran dan kebugaran menyumbang porsi terbesar dari penjualan teknologi wearable diikuti oleh perawatan kesehatan, infotainment, pertahanan, dan aplikasi perusahaan/industri (Grand View Research 2016). Sebagian besar teknologi yang dapat dikenakan adalah elektronik, mengkonsumsi daya yang tidak sedikit, dan membutuhkan perangkat penyimpan energi seperti baterai untuk beroperasi dengan benar. Variasi dalam jumlah dan jenis daya dan energi yang dibutuhkan oleh perangkat yang dapat dikenakan menciptakan banyak peluang bagi sistem sel surya yang dapat

dikenakan untuk memenuhi permintaan energi perangkat ini. Dari sekian banyak perangkat yang dapat dikenakan di pasaran, empat diperkirakan akan mendominasi pasar di seluruh dunia pada tahun 2022. Lebih dari 158 juta perangkat yang dikenakan di telinga diharapkan akan dijual, 193 juta perangkat yang dikenakan di pergelangan tangan termasuk jam tangan pintar, jam tangan olahraga, dan gelang pintar, 80 juta layar yang dipasang di kepala, dan hampir 20 juta potong pakaian pintar (Gartner 2018). Namun, opsi untuk perangkat yang dapat dikenakan jauh melampaui kepala dan pergelangan tangan (Gambar 8.1). Meskipun tinjauan komprehensif dari berbagai bentuk dan ukuran perangkat yang dapat dikenakan berada di luar cakupan bab ini, perangkat yang dipilih untuk mewakili berbagai kemungkinan dieksplorasi untuk mendapatkan apresiasi akan kebutuhan pemanenan dan penyimpanan energi yang dapat dikenakan.

BackBeat FIT (semua headset nirkabel) yang diperkirakan akan menguasai sekitar 30% pangsa pasar dunia dalam waktu dekat (Gartner 2018). AirPods adalah perangkat komunikasi yang dapat dikenakan yang memungkinkan komunikasi dua arah antara pengguna dan berbagai perangkat Apple termasuk iPhone, iPad, dan AppleWatch. AirPods berisi sensor optik dan gerak yang membatasi pemutaran audio ke waktu saat pengguna memakai AirPods dan juga mengambil perintah ketuk untuk mengontrol musik dan pemutaran audio lainnya. AirPods yang dikenakan di telinga juga dilengkapi

akselerometer untuk deteksi ucapan dan pengurangan kebisingan (Apple nd). Headset IconX Samsung menyediakan kemampuan pemutar musik (dengan atau tanpa smartphone yang menyertainya di sekitar) dan kemampuan pelacakan kebugaran untuk mencatat waktu, jarak, dan kalori yang terbakar selama berjalan atau berlari (Samsung nd).

Di luar produk tujuan umum di antara perangkat yang dikenakan di telinga, alat bantu dengar mencapai sekitar 15 juta (TheHearing Review2018) atau 45% dari perkiraan 33 juta unit yang dijual di seluruh dunia pada tahun 2018 (Gartner 2018). Sekitar 75% alat bantu dengar adalah model di belakang telinga (Strom 2018) dan sebagian besar menggunakan baterai tipe kancing sekali pakai. Sebaliknya, mayoritas headset atau headphone nirkabel termasuk AirPods, IconX, dan BackBeat FIT menggunakan baterai isi ulang.

**TABEL 8.3**

Permintaan Energi untuk Produk yang Dapat Dipakai di Telinga

<b>Produk</b>	<b>Jenis baterai</b>	<b>Baterai Kapasitas (Wh)</b>	<b>Baterai Hidup (h)</b>	<b>Energi Permintaan (Wh/jam)<sup>1000</sup></b>
<i>Headset/Headphone Nirkabel Serbaguna</i>				
Apple AirPod	Ion lithium	0,093	5	0,019
Samsung IconX		0,141	3,8	0,037
Plantronics Backbeat FIT		0,426	7	0,061
<i>Alat bantu Dengar</i>				
Eargo Neo (Alat Bantu Dengar)	Ion lithium	0,074	16	0,005
Eargo Neo (Charger Case) Widex	Seng 13	2,42	T/A	0,003
	Seng 312	0,25	126	0,003
		96		

<sup>1000</sup> Permintaan energi diperkirakan sebagai rasio kapasitas baterai terhadap masa pakai baterai, dinyatakan dalam Wh/jam, dan kira-kira sama dengan konsumsi daya rata-rata dalam watt.

Di masa depan, perangkat wearable berbasis telinga diharapkan dapat menggantikan smartphone melalui kemajuan headphone dan headset nirkabel. Versi mendatang dari produk ini diharapkan dapat memberikan arahan, menjawab pertanyaan, dan bertindak sebagai asisten pribadi virtual, sehingga memfasilitasi pertukaran informasi yang lebih bebas genggam (Gartner 2018). Ekspansi tersebut telah menyebabkan perangkat yang dikenakan di telinga mengalami pertumbuhan paling cepat di antara perangkat yang dapat dikenakan meskipun tertinggal dari perangkat yang dikenakan di pergelangan tangan dalam penjualan secara keseluruhan (Draper 2019). Tidak mengherankan, permintaan energi perangkat yang dapat dikenakan di telinga bervariasi tergantung pada fungsinya. Seperti yang terlihat dari sampel perangkat yang dikenakan di telinga di Tabel 8.3, perangkat yang bersifat umum dan dirancang untuk sering berkomunikasi dengan ponsel cerdas cenderung mengonsumsi energi paling banyak, sedangkan perangkat dengan tujuan khusus dan khusus (misalnya, alat bantu dengar) mengonsumsi jauh lebih sedikit energi.

Apakah mereka memiliki faktor bentuk yang lebih dekat dengan jam tangan atau gelang, perangkat yang dikenakan di pergelangan tangan melakukan berbagai fungsi dalam jejak yang dapat dikenakan. Istilah smartwatch sering digunakan untuk menggambarkan perangkat yang, dalam beberapa hal, bergantung pada smartphone untuk fungsionalitas penuh. Perangkat ini termasuk Apple Watch, jam tangan pintar berdasarkan sistem operasi Wear OS dan dijual oleh beberapa

vendor, dan jam tangan berdasarkan sistem operasi Tizen yang hanya berinteraksi dengan smartphone Samsung Galaxy. Sebagian besar jam tangan pintar melakukan sebagian dari apa yang dilakukan ponsel cerdas. Mereka dapat menampilkan pemberitahuan, mengoperasikan aplikasi, mengelola pemutaran media (misalnya, suara, musik, video), menjawab pesan menggunakan dikte suara, dan menyertakan Sistem Pemosisian Global (GPS) untuk memfasilitasi pelacakan lokasi dan pemberitahuan khusus lokasi. Jam tangan pintar juga menawarkan fungsi serupa dengan gelang pintar termasuk detak jantung, pembakaran kalori, dan pelacakan aktivitas. Beberapa jam tangan merasakan informasi tambahan mengenai aktivitas tubuh dan lokasi di ruang angkasa yang relevan dengan keselamatan dan kesehatan. Misalnya, Apple Watch menyertakan sensor jatuh yang mendeteksi jatuh, memantau pengguna untuk gerakan tambahan, dan dapat memperingatkan pihak berwenang atas nama pengguna jika tidak ada gerakan atau komunikasi pasca jatuh yang terdeteksi.

Jam tangan olahraga berbeda dari jam tangan pintar karena menyediakan fungsi yang jauh lebih sedikit bergantung pada smartphone yang menyertainya dan disesuaikan dengan aktivitas dan perilaku tertentu. Misalnya, jam tangan hiking seperti Garmin Fenix 5 (Garmin nd) berisi kompas dan altimeter tiga sumbu, keduanya dikalibrasi secara otomatis menggunakan GPS bawaan. Tekanan atmosfer dan suhu lingkungan diukur dengan barometer dan termometer on-board. Jam tangan secara otomatis mengatur waktu

berdasarkan lokasi yang terdeteksi GPS dan dapat memberikan petunjuk arah berdasarkan rute yang diimpor pengguna. Arloji ini juga menyimpan informasi aktivitas terperinci dan menyediakan pelacakan kebugaran termasuk perkiraan konsumsi oksigen dan dapat digunakan untuk berlari, berenang, ski, dan olahraga lain selain hiking. Sedangkan yang tahan lama, kokoh, Paket tahan abrasi dari jam tangan ini membedakannya dari jam tangan pintar dan gelang, fungsionalitas canggihnya serupa dengan jam tangan pintar, meskipun tanpa memerlukan smartphone terdekat. Jam tangan khusus aplikasi serupa tersedia untuk menyelam, terbang, berenang, serta kebugaran dan pelatihan tujuan umum. Hampir semua jam tangan olahraga khusus ini memiliki harga yang lebih mahal dibandingkan jam tangan pintar karena dirancang untuk beroperasi di lingkungan yang sulit. Smartwatch memiliki bentuk dan fungsi yang mirip dengan jam tangan biasa, tetapi juga memiliki fungsi yang memerlukan pairing ke smartphone. Gelang pintar, di sisi lain, cenderung memiliki fungsionalitas yang lebih sedikit, tidak perlu sering dipasangkan ke smartphone, dan memiliki tampilan yang lebih mendasar daripada jam tangan pintar. Karena fungsinya yang berkurang, gelang pintar juga membutuhkan lebih sedikit daya dan memiliki masa pakai baterai yang lebih lama. Sebagian besar baterai gelang, seperti yang ada di jam tangan pintar, dapat diisi ulang. Sejauh ini, aplikasi paling umum untuk gelang pintar adalah pelacakan kebugaran. 30% orang dewasa Amerika memiliki gelang seperti itu dan Fitbit memiliki pangsa pasar tertinggi di antara

produsen gelang pelacak kebugaran (Liu 2019). Gelang ini dapat secara otomatis melacak olahraga berdasarkan aktivitas seperti berlari, berjalan dan berenang, memantau detak jantung, memprediksi pembakaran kalori, dan melacak kesehatan wanita di antara fungsi-fungsi lainnya. Karena gelang pintar terus meningkat fungsinya, tumpang tindihnya dengan jam tangan pintar juga meningkat, sehingga semakin sulit untuk membedakan antara kedua jenis perangkat ini. Meski jumlahnya sedikit, beberapa gelang pintar juga telah berhasil didemonstrasikan untuk fungsi selain pelacakan kebugaran. Misalnya, gelang elektronik peka sentuhan dapat dipasang ke jam tangan pintar untuk memfasilitasi interaksi gaya keyboard dengan jam tangan pintar (Funk et al. 2014) yang tidak mungkin dilakukan dalam area tampilan terbatas pada jam tangan saja. Sunu (Sunu Inc nd) membuat gelang yang menggunakan sonar untuk mendeteksi rintangan terdekat bagi tunanetra dan memberikan umpan balik melalui pola getaran kepada pengguna. Kedua perangkat gelang ini menyarankan aplikasi potensial yang luas yang belum sepenuhnya dieksplorasi untuk perangkat yang dapat dikenakan di pergelangan tangan. Seperti halnya perangkat yang dikenakan di telinga, perangkat yang dibuat untuk penggunaan umum dan sering berkomunikasi dengan smartphone cenderung menghabiskan energi paling banyak. Perkiraan kebutuhan energi dalam Tabel 8.4 pastikan hal ini terjadi pada jam tangan pintar, rata-rata, mengonsumsi lebih banyak daya dan memiliki permintaan energi yang lebih tinggi

daripada perangkat lain yang dikenakan di pergelangan tangan.

**TABEL 8.4**

Permintaan Energi untuk Produk yang Dapat Dipakai di Pergelangan Tangan

Produk	Jenis baterai	Baterai Kapasitas (Wh)	Baterai Hidup (h)	Energi Permintaan (Wh/jam) <sup>sebaik</sup>
<i>Smartwatch Serba Guna</i>				
Apple Watch 4	Ion lithium	1.11	18	0,062
Fitbit Versa		0,54	96	0,006
Samsung Galaksi (46mm)		1.75	48	0,036
Samsung Galaksi (42 mm)		1.00	48	0,021
<i>Pelacak Kebugaran</i>				
Biaya Fitbit 2	Lithium-polimer	0,22	120	0,002
Huawei Honor Band 3		0,37	15	0,025
Samsung Gear Fit2 Pro	Ion lithium	0,74	72	0,010
<i>Jam Tangan Olahraga</i>				
Garmin Fenix 5 (Kebugaran Dasar)	Lithium-polimer	0,85	336	0,003
Garmin Fenix5 (GPS)			75	0,011
Garmin Fenix5 (GPS+) <sup>b</sup>			24	0,035

<sup>sebaik</sup> Permintaan energi diperkirakan sebagai rasio kapasitas baterai terhadap masa pakai baterai, dinyatakan dalam

Wh/jam, dan kira-kira sama dengan konsumsi daya rata-rata dalam watt.

<sup>b</sup>GPS + mencakup penentuan posisi yang tepat termasuk perhitungan mati menggunakan sensor gyro.

**TABEL 8.5**

Permintaan Energi untuk Produk yang Dapat Dipakai di Kepala

Produk	Aplikasi	Baterai	Baterai	Energi
		Kapasitas (Wh)	Hidup (h) <sup>1</sup>	Permintaan (Wh/Jam)
<i>Tampilan yang Dikenakan Kepala Virtual Reality (VR)</i>				
HTC Vive Wireless (VR)	Tujuan umum	37.2	2.5	14.9
Oculus Go (VR)	Permainan	9.36	2	4.68
<i>Augmented Reality (AR) Head-Worn Display</i>				
Microsoft HoloLens (AR)	Tujuan umum	61.1	2	30.5
Solos Kacamata Cerdas (AR) ODG R-7H (AR)	Bersepeda	1.48	5	0.296
	Industri berat; pertambangan	4.81	5	0.962
Vuzix M300 (AR)	Industri; manufaktur	0.592	2	0.296

<sup>1</sup>Jam penggunaan biasa sebelum pengisian ulang diperlukan.

.Permintaan energi diperkirakan sebagai rasio kapasitas baterai terhadap masa pakai baterai, dinyatakan dalam Wh/jam, dan kira-kira sama dengan konsumsi daya rata-rata dalam watt.

## 8.4 Ringkasan

Sementara total energi yang dibutuhkan untuk memberi daya pada jumlah total perangkat yang dapat dikenakan dan portabel individu mungkin tampak kecil dibandingkan dengan permintaan daya perumahan, area permukaan di mana seseorang dapat memakai panel surya juga sedikit lebih kecil daripada atap biasa. Lebih lanjut menambah tantangan, baterai, tempat baterai, dan persyaratan penggantian dan pengisian ulang (baik kapasitas dan kecepatan) untuk perangkat yang dapat dikenakan seringkali sama banyak dan beragamnya dengan perangkat itu sendiri. Di masa depan, konsumen kemungkinan akan dihadapkan pada pilihan perangkat wearable yang terus berkembang dan memusingkan, dan semakin banyak teknologi wearable akan dibutuhkan di militer, industri, dan bahkan dalam perawatan

kesehatan untuk memastikan lebih aman, lebih sehat. , dan operasi yang lebih andal. Dengan peningkatan yang tak terhindarkan dalam perangkat yang dapat dikenakan ini akan muncul minat yang lebih besar untuk alternatif bank daya berbasis baterai yang berdiri sendiri untuk memberi daya pada perangkat ini. Mengingat banyaknya cahaya baik dari sinar matahari alami dan sumber cahaya buatan di lingkungan sehari-hari individu, prospek memenuhi permintaan energi ini dengan sel surya dan sistem yang dapat dipakai sangat menarik. Sel surya yang dapat dipakai tetap menjadi pilihan yang menarik meskipun ada komplikasi yang ditimbulkan oleh platform seluler yang sangat dinamis (misalnya, tubuh manusia) tempat sistem sel surya ini harus beroperasi. prospek memenuhi permintaan energi ini dengan sel surya dan sistem yang dapat dipakai sangat menarik. Sel surya yang dapat dipakai tetap menjadi pilihan yang menarik meskipun ada komplikasi yang ditimbulkan oleh platform seluler yang sangat dinamis (misalnya, tubuh manusia) tempat sistem sel surya ini harus beroperasi. prospek memenuhi permintaan energi ini dengan sel surya dan sistem yang dapat dipakai sangat menarik. Sel surya yang dapat dipakai tetap menjadi pilihan yang menarik meskipun ada komplikasi yang ditimbulkan oleh platform seluler yang sangat dinamis (misalnya, tubuh manusia) tempat sistem sel surya ini harus beroperasi.

## Referensi

Apple. n.d. "AirPods." Apple. Accessed July 3, 2019. <https://www.apple.com/airpods/>. Arion. n.d. "ARION— Transform Your Running Technique." Accessed July 15, 2019. <https://www.arion.run/>

Athos. n.d. "Athos Training System." Athos. Accessed July 5, 2019. <https://shop.liveathos.com>.

Bcon. n.d. "World's First Gaming Wearable." Accessed July 15, 2019. <https://bcon.zone/>.

Benson, Lauren C., Christian A. Clermont, Eva Bošnjak, and Reed Ferber. 2018. "The Use of Wearable Devices for Walking and Running Gait Analysis Outside of the Lab: A Systematic Review." *Gait & Posture* 63 (June): 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.04.047>

Cho, Gilsoo, Seungsin Lee, and Jayoung Cho. 2010. "Review and Reappraisal of Smart Clothing." In *Smart Clothing: Technology and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press

Dorsavi. n.d. “DorsaVi Global—Wearable Sensor Technology & Movement Assessment.” Accessed July 15, 2019. <https://www.dorsavi.com/>.

Draper, Sam. 2019. “IDC: Wrist-Worn and Ear-Worn Wearables Lead the Market, Fueled by a Strong Growth Trajectory.” Wearable Technologies (blog). June 4, 2019. <https://www.wearable-technologies.com/2019/06/idc-wrist-worn-and-earworn-wearables-lead-the-market-fueled-by-a-strong-growth-trajectory/>.

Ergürel, Deniz. 2016. “Lower Costs Will Drive the Head Mounted Display Market.” Haptical. September 14, 2016. <https://haptic.al/head-mounted-display-reporttechnavio-2016-a5ee5fe36baf>

Fitbit. n.d. “Fitbit Official Site for Activity Trackers & More.” Accessed July 15, 2019. <https://www.fitbit.com/home>

Franklin, Neil. 2017. “More People Will Have Smartphones than Running Water or Bank Accounts by 2021, Claims Report.” Workplace Insight. February 14, 2017. <https://workplaceinsight.net/people-will-smartphones-running-waterbank-accounts-2021-claims-report/>

Funk, Markus, Alireza Sahami, Niels Henze, and Albrecht Schmidt. 2014. "Using a Touch-Sensitive Wristband for Text Entry on Smart Watches." In CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2305–2310. CHI EA '14. New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/2559206.2581143>.

Garmin. n.d. "Garmin Fenix® 5S Plus | Multisport GPS Watch." Garmin. Accessed July 5, 2019. <https://buy.garmin.com/en-US/US/p/603201>.

Gartner. 2018. "Gartner Says Worldwide Wearable Device Sales to Grow 26 Percent in 2019." Gartner. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-11-29-gartner-says-worldwide-wearable-device-sales-to-grow->

Grand View Research. 2016. "Wearable Technology Market Size, Share." <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wearable-technology-market>.

Grush, Andrew. 2019. "Android Smartphones with the Best Battery Life." Android Authority.

<https://www.androidauthority.com/best-android-phone-batterylife-2-755699/>.

Hanuska, Alex, Bharath Chandramohan, Laura Bellamy, Pauline Burke, Rajiv Ramanathan, and Vijay Balakrishnan. n.d. "Smart Clothing Market Analysis." <https://scet.berkeley.edu/wp-content/uploads/Smart-Clothing-MarketAnalysis-Report.pdf>.

Hoarn, Steven. 2014. "Tactical Assault Light Operator Suit (TALOS) Doesn't Lack Ambition or Interested Industry." Defense Media Network. May 21, 2014. <https://www.defensemедianetwork.com/stories/diverse-range-of-companieswork-on-the-tactical-assault-light-operator-suit-talos/>.

Illumio. n.d. "Higher Visibility Illumio Jackets." Accessed July 15, 2019. <https://myillumio.com/>

Iqbal, Mohammed H., Abdullatif Aydin, Oliver Brunckhorst, Prokar Dasgupta, and Kamran Ahmed. 2016. "A Review of Wearable Technology in Medicine." *Journal of the Royal Society of Medicine* 109 (10): 372–380.

Keller, Jared. 2019. "SOCOM's Iron Man Suit Is Officially Dead." Task & Purpose. <https://taskandpurpose.com/talos-iron-man-suit-dead>.

Komodo Technologies. n.d. "AIO Smart Sleeve—ECG Wearable & Heart Rate Variability Monitor." Accessed July 15, 2019. <http://komodotec.com/>

Liu, Shanhong. 2019. "Fitness & Activity Tracker." May 22, 2019. <https://www.statista.com/topics/4393/fitness-and-activity-tracker/>.

Lumo. n.d. "Lumo Bodytech." Accessed July 15, 2019. <https://support.lumobodytech.com/hc/en-us>.

Motiv. n.d. "Motiv Ring." Motiv. Accessed July 15, 2019. <https://mymotiv.com/>

Osborne, Joe. 2017. "Microsoft Surface Pro (2017) Review." TechRadar. <https://www.techradar.com/reviews/microsoft-surface-pro/2>

Oura. n.d. "Oura Ring: The Most Accurate Sleep and Activity Tracker." Accessed July 15, 2019. <https://ouraring.com/>.

Pew Research Center. 2015. "U.S. Technology Device Ownership: 2015." <http://www.pewinternet.org/2015/10/29/technology-device-ownership-2015/>.

Pew Research Center. 2019a. "Smartphone Ownership Is Growing Rapidly Around the World, but Not Always Equally." Pew Research Center's Global Attitudes, Project (blog). February 5, 2019. <https://www.pewresearch.org/global/2019/02/05/smartphone-ownership-is-growing-rapidly-around-the-world-but-not-always-equally/>

Pew Research Center. 2019b. "Use of Smartphones and Social Media Is Common across Most Emerging Economies." March 7, 2019. <https://www.pewinternet.org/2019/03/07/use-of-smartphones-and-social-media-is-common-acrossmost-emerging-economies/>.

Plantronics. n.d. "BackBeat FIT 2100, Wireless Sport Headphones." Accessed July 3, 2019.

<https://www.plantronics.com/us/en/product/backbeat-fit-2100>.

Reisinger, Don. 2019. "Best MP3 Players 2019." Tom's Guide. May 28, 2019. [https:// www.tomsguide.com/us/best-mp3-players,review-6107.html](https://www.tomsguide.com/us/best-mp3-players,review-6107.html).

Rioja, Alejandro. 2019. "17 Best Smartphones with Largest Battery Capacity." Flux Chargers. <https://www.fluxchargers.com/blogs/flux-blog/best-smartphoneslargest-battery-capacity-life>.

Runscribe. n.d. "RunScribe Gait Analysis Platform." Accessed July 15, 2019. <https://runscribe.com/>.

Samsung. n.d. "Gear IconX." The Official Samsung Galaxy Site. Accessed July 3, 2019. <http://www.samsung.com/global/galaxy/gear-iconx/>.

Scataglini, Sofia, Giuseppe Andreoni, and Johan Gallant. 2015. "A Review of Smart Clothing in Military." In Proceedings of the 2015 Workshop on Wearable Systems and Applications, 53–

54. WearSys '15. New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/2753509.2753520>

Sensoria. n.d. "Sensoria Artificial Intelligence Sportswear." Accessed July 15, 2019. <https://www.sensoriafitness.com/>.

Spire Health. n.d. "Spire Health: Clinical-Grade Health Monitoring and Insights." Accessed July 15, 2019. <https://spirehealth.com/>.

Statista. 2018. "Share of Households with a Computer Worldwide 2005–2018." Statista. <https://www.statista.com/statistics/748551/worldwide-households-with-computer/>.

Statista. 2019. "Tablet Ownership among U.S. Adults 2010–2019." Statista. <https://www.statista.com/statistics/756045/tablet-owners-among-us-adults/>.

Statista. n.d. "Global E-Book Reader Shipments 2008–2016." Statista. Accessed July 21, 2019.

<https://www.statista.com/statistics/272740/global-shipments-of-ebook-readers/>.

Strom, Karl. 2018. "Will Hearing Aid Sales Top 4 Million Units in 2018?" Hearing Review. <http://www.hearingreview.com/2018/11/will-hearing-aid-sales-top4-million-units-2018/>

Sunu Inc. n.d. "Sunu Band." Accessed July 15, 2019. <https://www.sunu.com/en/index.html>.

Tabari, Rammi. 2019. "Laptops with Best Battery Life 2019—Longest Lasting Laptop Batteries." <https://www.laptopmag.com/articles/all-day-strong-longest-lastingnotebooks>.

Takahashi, Dean. 2017. "Superflex Unveils Powered Super Clothing Created with Designer Yves Béhar." VentureBeat (blog). January 11, 2017. <https://venturebeat.com/2017/01/11/superflex-unveils-powered-super-clothing-created-bydesigner-yves-behar/>.

The Hearing Review. 2018. "EHIMA Data Shows 5.7% Increase in Global Hearing Aid Sales." Hearing Review. <http://www.hearingreview.com/2018/05/ehima-data-shows-increase-global-hearing-aid-sales/>.

Upright. n.d. "Upright Posture Training Device—Everyday Posture Coaching." Accessed July 15, 2019. <https://www.uprightpose.com/>.

Velocity. 2017. "Cell Phone Battery Statistics 2015 2016 2017." <https://velocity.us/2015-phone-battery-statistics/>

## **Tentang Penulis**

Fitria Hidayanti lahir di Palembang pada tanggal 04 September 1978 dan telah menyelesaikan pendidikan Sarjana Kimia dari Institut Teknologi Bandung (2002), Magister Material Science dari Universitas Indonesia (2006). Saat ini sedang menyelesaikan Studi Doktorat sejak tahun 2018 di Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia. Sejak tahun 2009, menekuni bidang Teknik Fisika di Universitas Nasional, Jakarta.



## Tentang Penulis



Dr (Can) Fitria Hidayanti lahir di Palembang pada tanggal 04 September 1978 dan telah menyelesaikan pendidikan Sarjana Kimia dari Institut Teknologi Bandung (2002), Magister Material Science dari Universitas Indonesia (2006) dan sedang menyelesaikan studi doktoral pada Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia (2018-sekarang). Sejak tahun 2009, menekuni bidang Teknik Fisika di Universitas Nasional, Jakarta.

ISBN 978-623-7376-99-6



9 786237 376996