



Silicij in perovskit: dve poti razvoja sončnih panelov

Klasična fotovoltaika na osnovi kristalnega silicija je danes daleč prevladujoča tehnologija, predvsem zaradi desetletij razvoja, velike proizvodne baze, preverjene življenjske dobe in nizke cene. Perovskitne celice obljublajo višji izkoristek in potencialno manj materiala ter energije pri izdelavi, vendar še niso tehnološko in tržno enakovredne silicijevim modulom.

Pomembno je razlikovati med samostojno perovskitno celico in tandemsko celico perovskit-silicij. Pri slednji perovskit ne nadomesti silicija, ampak je nameščen nad njim; obe plasti izkoriščata različna dela sončnega spektra.

Osnovna razlika

Kristalni silicij

Silicijeva celica uporablja polprevodniški p - n spoj. Sončni fotoni v siliciju ustvarijo elektrone in vrzeli, električno polje pa jih loči ter omogoči nastanek električnega toka.

Sodobni moduli temeljijo predvsem na monokristalnem siliciju in izvedbah, kot so:

- PERC;
- TOPCon;
- HJT oziroma heterospoj;
- IBC oziroma zadnji kontakti.

Silicij ima dobro stabilnost, dolgo dokazano življenjsko dobo in razvito industrijsko infrastrukturo. Njegova teoretična meja izkoristka pri enospojni sončni celici je približno 29–30%, pogosto se navaja meja Shockley–Queisser okoli 29,4%. To je meja za en sam polprevodniški spoj, ne pa za tandemske ali večspojne celice.

Najboljši laboratorijski silicijevi elementi so že zelo blizu tej meji, vendar so komercialni moduli manj učinkoviti zaradi izgub pri povečanju površine, povezovanju celic, steklu, kontaktih, temperaturi in drugih sestavnih delih. NREL-ov pregled raziskovalnih rekordov ločuje med kristalnim silicijem, samostojnimi perovskiti in tandemskimi perovskitno-silicijevimi celicami. ^[1] ^[2]

Perovskit

Perovskit je skupno ime za materiale s posebno kristalno strukturo. Pri sončnih celicah se najpogosteje uporabljajo kovinski halogenidni perovskiti, pogosto s svincem in organskim ali anorganskim kationom.

Glavne prednosti so:

- zelo močna absorpcija svetlobe;
- možnost izdelave zelo tankih absorpcijskih plasti;
- potencial nizkotemperaturne proizvodnje;
- možnost nanašanja na steklo, folijo ali drugo podlago;
- nastavljiva energijska vrzel;
- možnost izdelave lahkih, fleksibilnih ali polprozornih modulov.

Perovskit ima pomembno prednost pri načrtovanju tandemskih celic. Njegovo energijsko vrzel je mogoče prilagoditi tako, da zgornja perovskitna celica učinkovito absorbira predvsem visokoenergijske fotone, silicijeva spodnja celica pa preostanek spektra. Tako se zmanjšajo izgube zaradi dejstva, da ima en sam material eno samo optimalno energijsko vrzel.

Zato perovskitno-silicijeve tandemске celice že dosegajo izkoristke nad mejo, ki velja za samostojno silicijevo celico. Vendar rekord laboratorijske celice ni enakovreden komercialnemu modulu velike površine.

Primerjava tehnologij

Lastnost	Kristalni silicij	Samostojni perovskit	Perovskit-silicij tandem
Osnovni absorber	Kristalni Si	Kovinski halogenidni perovskit	Perovskit nad silicijem
Tehnološka zrelost	Zelo visoka	Nizka do srednja	Pilotna oziroma zgodnja komercialna
Glavna prednost	Cena, zanesljivost, dolga življenjska doba	Tanek sloj, nastavljiva optika, potencial nizke porabe materiala	Višji izkoristek brez sorazmernega povečanja površine
Teoretična meja	Približno 29–30% za enospojno celico	Višja od silicija pri optimalni energijski vrzeli, približno 33% za idealno enospojno zasnovo	Približno 43% za idealen dvospotni tandem
Današnji trg	Množičen svetovni trg	Omejen in nišen	Omejena komercialna proizvodnja
Ključna težava	Približevanje teoretični meji, materialna in energetska zahtevnost proizvodnje	Stabilnost, povečanje merila, svinec, enkapsulacija	Stabilnost perovskita, integracija, cena in zanesljivost
Življenjska doba	Dobro dokazana, običajno približno 25–30 letna garancijska doba modula	Še ni primerljivo dokazana	Še ni primerljivo dokazana v množičnem obratovanju

Pri učinkovitosti je treba vedno navesti, ali govorimo o laboratorijski celici, modulu ali celotnem sistemu. Trenutni raziskovalni rezultati za perovskitno-silicijeve tandeme so okoli sredine tridesetih odstotkov, medtem ko je trg silicijevih modulov že optimiziran za serijsko proizvodnjo. ^[3] ^[4]

Kdo obvladuje tehnologiji?

Silicijeva tehnologija

Svetovno proizvodnjo kristalnih silicijevih modulov, rezin in celic močno obvladuje Kitajska. Podatki IEA PVPS in panožnih poročil kažejo, da je bilo leta 2024 približno 86% svetovne proizvodnje modulov skoncentrirane na Kitajskem, medtem ko so bile pri polisiliciju, rezinah, celicah in moduli kitajske tržne uteži še višje. ^[5] ^[6]

Med najpomembnejšimi proizvajalci in razvijalci so:

- LONGi;
- JinkoSolar;
- Trina Solar;
- JA Solar;
- Canadian Solar;
- Tongwei;
- Aiko;
- TCL Zhonghuan;
- Hanwha Qcells;
- First Solar, ki je pomemben predvsem pri tankoplastni tehnologiji CdTe, ne pri klasičnem kristalnem siliciju.

Pri naprednih silicijevih celicah je pomembno tudi, kdo ima lastno proizvodnjo rezin, polisilicija, celic in modulov. Prednost ni samo v laboratorijskem rekordu, temveč v dostopu do opreme, kapitala, surovin, proizvodnega znanja in velikih naročil.

Silicijeve tehnologije so leta 2025 predstavljale približno 98% svetovne proizvodnje fotonapetostnih modulov. ^[7]

Perovskitna tehnologija

Perovskitni trg je precej bolj razdrobljen in še ni primerljiv z množičnim trgom silicija. Razvoj poteka v več podjetjih, raziskovalnih ustanovah in industrijskih konzorcijih.

Med vidnejšimi akterji so:

- Oxford PV iz Združenega kraljestva in Nemčije, posebej pomemben pri tandemskih perovskitno-silicijevih moduli;
- UtmoLight iz Kitajske;

- GCL Perovskite oziroma GCL Suzhou Nanotechnology;
- Microquanta Semiconductor;
- Saule Technologies s poudarkom na fleksibilnih in specializiranih perovskitnih moduli;
- WonderSolar in druga kitajska podjetja;
- LONGi, JinkoSolar, Trina Solar in drugi veliki silicijevi proizvajalci, ki razvijajo tandemske rešitve.

Oxford PV je leta 2024 poročal o prvih komercialnih dobavah tandemskih modulov za ameriškega kupca. Kitajski proizvajalci pa gradijo večje pilotne in demonstracijske linije; UtmoLight je na primer napovedal gigavatno proizvodno linijo za perovskitne module. Pri teh podatkih je potrebna previdnost, saj napovedana zmogljivost proizvodne linije še ne pomeni, da je dosegla stabilno množično proizvodnjo in dolgoročno kakovost. ^[8] ^[9]

Trenutno torej velja:

- silicij obvladuje obstoječi svetovni trg;
- Kitajska obvladuje večino silicijeve dobavne verige;
- pri perovskitu poteka **tehnološka tekma**, pri kateri so pomembna kitajska podjetja, Oxford PV in številni raziskovalni konzorciji;
- veliki silicijevi proizvajalci imajo prednost pri tandemih, ker že obvladajo proizvodnjo silicijeve spodnje celice.

Kakšna je razlika v ceni?

Pri primerjavi cen je treba ločiti tri stvari:

1. strošek izdelave celice;
2. cena končnega modula;
3. strošek proizvedene elektrike skozi življenjsko dobo, torej LCOE.

Današnje stanje

Silicijevi moduli so poceni zaradi:

- zelo velikih proizvodnih serij;
- izkušenj z avtomatizacijo;
- razvite dobavne verige;
- standardiziranih postopkov;
- visoke proizvodne konkurence;
- dolgo optimiziranih procesov rezanja, teksturiranja in pasivacije.

Pri perovskitu so potencialni stroški materiala in procesiranja nizki, vendar so današnji dejanski stroški še obremenjeni z:

- nizkimi proizvodnimi izkoristki;

- majhnimi serijami;
- dragim razvojem in nadzorom kakovosti;
- zahtevno enkapsulacijo;
- kratkejšo dokazano življenjsko dobo;
- stroški kvalifikacije in garancijskih rezerv;
- še nerazvitim recikliranjem.

Raziskave zato dajejo zelo različne rezultate. Tehno-ekonomska analiza iz leta 2025 je za trenutno perovskitno tehnologijo ocenila proizvodni strošek približno 0,57 USD/W in LCOE približno 18–22 ameriških centov/kWh, pri čemer je bil rezultat močno odvisen od učinkovitosti in življenjske dobe. Model je pokazal, da bi perovskit postal konkurenčen siliciju šele ob učinkovitosti nad približno 25% in življenjski dobi okoli 25 let. ^[10]

Po drugi strani študije prihodnje proizvodnje z velikimi serijami napovedujejo precej nižje stroške, zlasti pri tiskanih ali roll-to-roll postopkih. To so **projekcije**, ne pa nujno današnje tržne cene. ^[11]

Za tandemske module je najbolj realna trenutna ocena, da so dražji na enoto nazivne moči, vendar lahko zaradi večjega izkoristka zmanjšajo strošek na enoto površine in strošek celotnega sistema. Analiza tandemskih modulov je pokazala, da bi se pri povečanju učinkovitosti na približno 30% modelirani strošek lahko približal strošku silicijevega modula, vendar so rezultati odvisni od države proizvodnje, obsega, spodbud in konfiguracije modula. ^[12]

Praktični sklep o ceni

Danes je klasični silicijev modul praviloma cenejši in bistveno manj tvegan nakup. Perovskit je lahko zanimiv tam, kjer ima dodatna učinkovitost posebno vrednost:

- na strehah z omejeno površino;
- na fasadah;
- pri lahkih konstrukcijah;
- pri integraciji v stavbe;
- na vozilih ali prenosnih napravah;
- pri večjih sistemih, kjer je omejitev površina ali priključna infrastruktura.

Ogljični odtis

Silicij

Pri silicijevih moduli je največji vpliv običajno povezan z:

- proizvodnjo polisilicija;
- rastjo kristala in izdelavo rezin;
- električno energijo v proizvodnji;

- izdelavo aluminijastih okvirjev in stekla;
- transportom ter drugimi sistemskimi komponentami.

IEA PVPS za sodobne fotonapetostne sisteme navaja življenjske emisije približno 25–44 g CO₂-ekvivalentov na kWh, odvisno od tehnologije, lokacije proizvodnje, sončnega obsevanja, življenjske dobe in metodologije LCA. Za mono-Si je v posodobljenem pregledu navedena vrednost približno 20 g CO₂-ekvivalentov/kWh pri določenem scenariju. ^[13] ^[14] ^[15]

Razpon je velik, ker na rezultat pomembno vplivajo:

- ali je elektrika za proizvodnjo pridobljena iz premoga, plina ali obnovljivih virov;
- koliko let modul obratuje;
- koliko elektrike proizvede na enoto moči;
- ali se upoštevajo reciklažni krediti;
- ali so vključeni nosilci, razsmerniki in omrežna infrastruktura.

Perovskit

Perovskit ima potencialno nižji ogljični odtis, ker:

- uporablja zelo tanko aktivno plast;
- lahko nastaja pri nižjih temperaturah;
- lahko doseže višjo učinkovitost;
- zahteva manj silicijevega materiala pri tandemski izvedbi;
- lahko uporablja manj energije za pripravo absorpcijske plasti.

Vendar ni pravilno samodejno trditi, da ima vsak perovskitni modul nižji ogljični odtis. Pri nekaterih zgodnjih zasnovah velik del vpliva povzročata steklo in energijsko zahtevna izdelava substrata, pri majhnih proizvodnih serijah pa je ogljični odtis lahko zelo visok. Pregled LCA študij iz leta 2026 je pokazal zelo širok razpon rezultatov in opozoril, da so ocene perovskita močno odvisne od proizvodnega postopka, življenjske dobe in sistemskih meja. ^[16]

Novejše študije pri optimiziranih, dolgoročno stabilnih in reciklabilnih zasnovah navajajo približno 10–25 g CO₂-ekvivalentov/kWh, vendar je treba te vrednosti razumeti kot **scenarijske ocene**, ne kot univerzalno izmerjeno lastnost vseh komercialnih perovskitnih modulov. ^[17]

Najpomembnejše pravilo je:

Višja učinkovitost zmanjša materialni in sistemski vpliv na proizvedeno kWh, vendar le, če modul dovolj dolgo ohrani svoje lastnosti.

Če bi perovskitni modul hitro degradiral, bi bila njegova proizvodnja razporejena na manj proizvedene elektrike, zato bi lahko njegov odtis na kWh postal slabši od silicijevega.

Vodni odtis

Silicij

Vodni vpliv silicijeve fotovoltaike nastaja predvsem pri:

- proizvodnji in čiščenju silicija;
- izdelavi rezin;
- čiščenju površin;
- proizvodnji stekla in drugih materialov;
- proizvodnji elektrike, ki napaja tovarne.

Pri vodnem odtisu je pomembno razlikovati med:

- odvzemom vode;
- porabo vode;
- vodnim stresom na lokaciji;
- skupnim vodnim odtisom v celotni dobavni verigi.

Enaka količina porabljene vode ima lahko v vodnato bogati regiji bistveno manjši lokalni pomen kot v sušnem območju. UNECE ugotavlja, da je pri fotovoltaiki vodni vpliv večinoma povezan s proizvodnjo elektrike oziroma proizvodnjo silicijevih celic, ne pa z obratovanjem modula. ^[18]

Perovskit

Perovskit ima potencial za nižjo porabo procesne vode, ker je aktivna plast zelo tanka in se lahko nanaša z raztopinami ali tiskarskimi postopki. Tandemska zasnova lahko dodatno zmanjša vodni odtis na proizvedeno kWh zaradi višjega izkoristka.

Toda tudi tukaj so podatki še negotovi. Dejanski vodni odtis je odvisen od:

- izbire topil;
- načina čiščenja;
- proizvodnje stekla;
- proizvodne atmosfere;
- enkapsulacije;
- izmeta in ponovne izdelave;
- uporabljene električne energije;
- trajanja obratovanja.

Ena novejša primerjalna analiza je pri modeliranem tandemskem sistemu ocenila manjši skupni okoljski vpliv in nižjo porabo vode kot pri kristalnem siliciju, vendar so to rezultati določenega modela in niso neposredna meritev vseh komercialnih tehnologij. ^[19]

Največji okoljski problem perovskita: svinec in konec življenjske dobe

Večina visoko učinkovitih perovskitnih celic vsebuje svinec. Količina svinca je majhna v primerjavi z maso stekla ali aluminija, vendar je okoljsko pomembna zaradi potencialne toksičnosti.

Zato mora biti pri ocenjevanju perovskita odgovorjeno na vprašanja:

- Ali enkapsulacija prepreči izluževanje svinca?
- Kako se modul obnaša po poškodbi?
- Ali obstaja nadzorovano zbiranje po koncu življenjske dobe?
- Ali je mogoče svinec in druge materiale učinkovito ločiti?
- Ali so reciklažni postopki industrijsko izvedljivi?
- Ali se pri LCA upoštevajo koristi recikliranja ali tveganja odlaganja?

Novejše LCA analize izrecno poudarjajo, da so okoljske prednosti perovskitnih modulov pogojne: veljajo predvsem ob dobro zasnovani enkapsulaciji, dolgi življenjski dobi in nadzorovanem zbiranju ter recikliranju frakcij, ki vsebujejo svinec. ^[20] ^[17]

Kaj je trenutno najbolj pošten sklep?

Merilo	Prednost danes
Cena modula	Kristalni silicij
Razpoložljivost	Kristalni silicij
Dokazana življenjska doba	Kristalni silicij
Svetovna proizvodna zmogljivost	Kristalni silicij
Najvišji potencialni izkoristek enojnega spoja	Perovskit
Najvišji potencialni izkoristek v tandemu	Perovskit-silicij
Majhna masa in fleksibilnost	Perovskit
Teoretični proizvodni ogljični in vodni potencial	Perovskit
Dokazani okoljski rezultat v množični uporabi	Kristalni silicij
Okoljska negotovost	Perovskit, predvsem zaradi stabilnosti in svinca

Klasični silicij je torej danes **industrijski standard**, perovskit pa **tehnologija z velikim razvojnim potencialom**. Najverjetnejša kratko- in srednjeročna pot ni popolna zamenjava silicija, ampak tandem: perovskitna zgornja celica bo dopolnila silicijevo spodnjo celico.

Za okoljsko primerjavo je treba gledati celoten življenjski cikel, ne samo količine materiala ali laboratorijskega izkoristka. Perovskit lahko doseže nižji ogljični in vodni odtis na proizvedeno kWh, vendar le ob hkratni izpolnitvi treh pogojev: dovolj visok izkoristek, življenjska doba primerljiva s silicijem in varen krožni tok materialov ob koncu uporabe.

1. <https://www.nlr.gov/media/docs/libraries/pv/cell-pv-eff.pdf>
2. <https://www.nlr.gov/pv/interactive-cell-efficiency>
3. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
4. <https://www.fluxim.com/research-blogs/perovskite-silicon-tandem-pv-record-updates>
5. <https://www.pv-magazine-australia.com/2025/10/20/thirty-five-countries-now-operate-gw-scale-annual-pv-markets/>
6. <https://tech.yahoo.com/science/articles/france-backed-pv-data-delivers-050300145.html>
7. <https://www.pv-magazine.com/2026/06/25/itrpv-global-solar-module-shipments-reached-approximately-706-gw-in-2025/>
8. <https://www.surgepv.com/blog/perovskite-solar-panels-commercial-use>
9. <https://www.kingsresearch.com/blog/10-best-companies-in-the-perovskite-solar-cells-market>
10. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-025-01744-x>
11. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1832022>
12. [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(24\)00466-5](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(24)00466-5)
13. <https://iea-pvps.org/fact-sheets/fact-sheet-environmental-life-cycle-assessment-of-electricity-from-pv-systems/>
14. <https://www.pv-magazine.com/2024/06/27/iea-pvps-releases-fact-sheet-on-environmental-life-cycle-assessment-of-pv-systems/>
15. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/05/Slides_IEA-PVPS-T12_Fact-Sheet-update-2023_v2.0.pdf
16. <https://www.mdpi.com/2071-1050/18/10/4639>
17. <https://www.mdpi.com/1996-1073/19/14/3320>
18. https://unece.org/sites/default/files/2021-09/202109_UNECE_LCA_1.2_clean.pdf
19. <https://thehive.icipe.org/rsif-all-scholars-publications/455/>
20. <https://www.mdpi.com/1996-1944/19/14/2996>
21. <https://www.nlr.gov/pv/cell-efficiency>
22. <https://www.nature.com/articles/s41467-025-66480-7>
23. <https://www.longi.com/en/news/breakthroughs-in-hibc-and-flexible-silicon-based-tandem-solar-cells-nature/>
24. <https://earthenenergylog.com/articles/cell-efficiency-records-2026>
25. <https://www.greenfueljournal.com/post/perovskite-solar-cell-revolution-2026-part-i>
26. <https://www.enectiva.cz/en/blog/2026/02/comparison-of-latest-pv-cell-technologies-2026/>
27. <https://energy-solutions.co/articles/sub/perovskite-solar-cells-efficiency-explained>
28. <https://www.surgepv.com/blog/solar-cell-efficiency-records-timeline>
29. <https://www.scribd.com/document/1004134089/Perov-Skite>
30. <https://www.surgepv.com/blog/topcon-vs-hjt-vs-perovskite-solar-panels>
31. <https://vocal.media/earth/perovskite-silicon-tandem-solar>
32. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC13235550/>
33. <https://axis-intelligence.com/china-solar-industry-statistics/>
34. <https://www.emi-bg.com/en/photovoltaics-report-2026-solarnata-energiya-navliza-v-nov-etap-na-globalnato-si-razviti-e/>

35. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-nacional-de-loja/eficiencia-en-energia/photovoltaics-report-ise-market-trends-efficiency-insights-2025/153541414>
36. <https://www.scribd.com/document/1001098201/Photovoltaics-Report>
37. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/perovskite-solar-cells-market>
38. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10596340/>
39. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/su/d4su00431k>
40. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/f2c16520-2e8d-4781-ad88-6b6866798129>
41. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/42nd-eupvsec-2025/Goraya_5CP2_3pdf.pdf
42. [https://elib.dlr.de/138075/1/Abeer Ali Khan Life Cycle Assessment \(LCA\) of Future Perovskite Tandem Solar Cells Final Version.pdf](https://elib.dlr.de/138075/1/Abeer%20Ali%20Khan_Life%20Cycle%20Assessment%20(LCA)%20of%20Future%20Perovskite%20Tandem%20Solar%20Cells_Final%20Version.pdf)
43. <https://research-hub.nlr.gov/en/publications/technoeconomic-analysis-of-perovskite-silicon-tandem-solar-modules/>
44. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/11/Fact-Sheet-IEA-PVPS-T12-23-LCA-update-2022.pdf>