

Anyag- és energiaáramok a napelemes rendszerekben: szakirodalmi áttekintés az LCA szemszögéből

Berecz Norbert¹, Gröller György², Ürmös Antal², Nemcsics Ákos²

¹Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Népszínház u. 8., H-1081 Budapest, Magyarország

Környezetmérnöki és Természettudományi Intézet, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Doberdó út 6, H-1034 Budapest, Magyarország

² Mikroelektronikai és Technológia Tanszék, Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Tavaszmező utca 17, H-1084 Budapest, Magyarország

berecz.norbert@uni-obuda.hu, groller.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu,

urmos.antal@kvk.uni-obuda.hu, nemcsics.akos@kvk.uni-obuda.hu

Absztrakt: A fotovoltaikus rendszerek elterjedése új környezeti és fenntarthatósági kihívásokat hoz magával. A tanulmány az életciklus-elemzés (LCA) módszerével vizsgálja a különböző generációs PV technológiák anyag- és energiaáramait a nyersanyag-kitermeléstől az újrahasznosításig. A kristályos szilícium rendszerek dominánsak, de energiaigényesek; a vékonyrétegű megoldások kedvezőbb környezeti profilt mutatnak, ugyanakkor néhány esetben ritka és toxikus elemeket tartalmaznak. A harmadik generációs technológiák ígéretesek, de stabilitásuk néhány esetben még korlátozott. A kiforrott technológiájú és helyesen legyártott napelem hosszú élettartamú, ennek ellenére foglalkoznunk kell az életciklusával. Az újrahasznosítás technológiaként eltérő megközelítést igényel, és kulcsszerepet játszik a körforgásos gazdaságban. A tanulmány kiemeli a szabályozási környezet, az infrastruktúra és a gyártói felelősség fejlesztésének fontosságát.

Kulcsszavak: szilícium, ritkaföldfémek, többgenerációs napelemek, életciklus-elemzés, napelemek újrahasznosítása, GaAs

1 Bevezetés

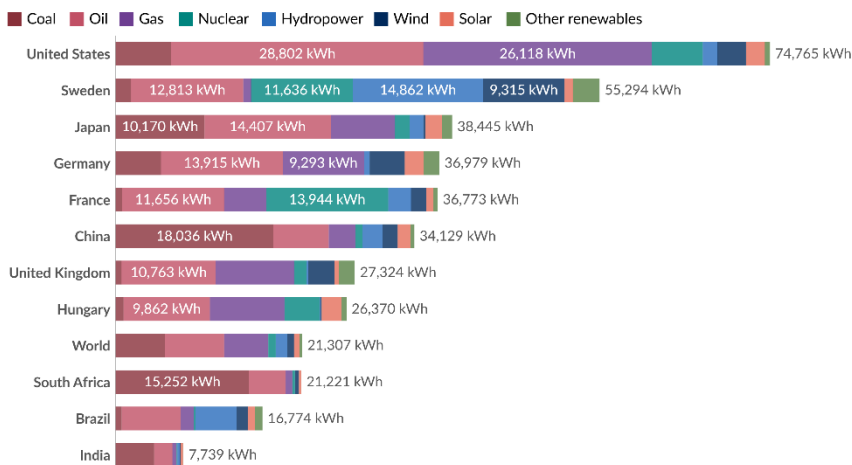
Az elmúlt években, illetve évtizedekben a napelemes rendszerek gyártása és telepítése iránt világszerte dinamikusan növekvő igény mutatkozik, amely jól tükröződik a globális energiamix átalakulásában. Ennek ellenére az energiaellátásban továbbra is meghatározó szerepet töltenek be a fosszilis energiahordozók (1. ábra) [1].

A fosszilis energiahordozók hatalmas szerepet játszanak a környezet terhelésében, különösen az üvegházhatású gázok kibocsátása révén, amely jelentős mértékben hozzájárul a globális felmelegedéshez és az éghajlatváltozáshoz. Ezzel szemben a megújuló energiaforrások, különösen a napelemes rendszerek, lehetőséget kínálnak az energiaellátás dekarbonizációjára.

Per capita primary energy consumption by source, 2024

Our World in Data

Primary energy¹ is measured in kilowatt-hours² per person, using the substitution method³.



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Population based on various sources (2024)
OurWorldinData.org/energy-mix | CC BY

32. ábra: Globális energiamix (2024) [2]

A napelemes rendszerek iránti növekvő kereslet mögött összetett tényezők állnak, amelyek közé tartoznak a globális geopolitikai átrendeződések, a folyamatos népességnövekedés, valamint a környezeti fenntarthatóság iránti egyre sürgetőbb társadalmi és gazdasági igények. Emellett az elektromobilitás gyors térnyerése is jelentős hatással van az energiaigények szerkezetére, tovább ösztönözve a tisztta, decentralizált energiatermelési megoldások, így a fotovoltaiikus rendszerek alkalmazását. [3].

A napelemes rendszerek gyártásának és telepítésének igénye az elmúlt évtizedekben jelentős növekedést mutatott, válaszul a globális energiamix dekarbonizációs törekvéseire. Bár a fosszilis energiahordozók továbbra is meghatározó szerepet töltenek be, környezeti terhelésük – különösen az üvegházhatású gázok kibocsátása révén – sürgeti az alternatív, fenntartható technológiák térnyerését. A megújuló energiaforrások, ezen belül a fotovoltaikus rendszerek, ígéretes lehetőséget kínálnak a tiszta energiatermelésre, ugyanakkor teljes környezeti hatásuk csak a teljes életciklusuk figyelembevételével értékelhető. Az életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) módszertana lehetőséget biztosít a „bölcsőtől a sírig” elv alapján történő vizsgálatra, amely magában foglalja a nyersanyag-kitermelést, a gyártást, az üzemeltetést, valamint az életciklus végén történő újrahasznosítást [4, 5]. A különböző generációs PV technológiák eltérő anyag- és energiaáramokat, valamint újrahasznosítási lehetőségeket képviselnek [6], amelyek tudományos értékelése elengedhetetlen a fenntartható fejlődés szempontjából.

A szakirodalmi áttekintés foglalkozik a fotovoltaikus technológiák fejlődésével, különös tekintettel az életciklus-elemzés (LCA) alkalmazására, amely lehetővé teszi a rendszerek környezeti hatásainak átfogó értékelését. Emellett kiemelésre kerülnek a harmadik generációs, koncentrátoros GaAs-alapú napelemek, amelyek magas hatásfokok és speciális anyagtulajdonságaik révén ígéretes alternatívát jelentenek a jövő nagy teljesítményű PV rendszerei számára.

2 A napelemek fejlődésnek áttekintése

A napenergia közvetlen hasznosításának lehetősége – a fotovoltaikus hatás – az energetikai átmenet kulcseleme lett, amely nélkülözhetetlen a globális dekarbonizációs törekvések megvalósításában. A napelemes rendszerek fejlődése nemcsak technológiai, hanem gazdasági és társadalmi szempontból is jelentős: immár lehetőséget kínálnak decentralizált, tiszta energiatermelésre, az ipari infrastruktúra részévé válva, mindemelllett csökkentik az üvegházhatású gázok kibocsátását és fokozzák az energiafüggetlenséget.

2.1. Történeti és technológiai fejlődés

2.1.1. Az első lépések a napelemes technológia felé

A fotovoltaikus technológia alapjait már a 19. században lefektették. 1839-ben Alexandre Edmond Becquerel fedezte fel a fotovoltaikus hatást [8], amikor kimutatta, hogy fény hatására bizonyos anyagok elektromos áramot generálnak.

Ezt követően, 1883-ban Charles Fritts amerikai feltaláló készítette el az első „modern” napelemet szelénből, aranybevonattal, bár annak hatásfoka kevesebb mint 1% volt [9]. Az 1880-as és 1890-es években olyan kutatók, mint Heinrich Hertz, Alekszandr Sztoletov és Wilhelm Hallwachs, tovább mélyítették a fotoelektromos jelenség fizikai megértését, amelynek elméleti alapjait Albert Einstein 1905-ben publikálta, és amelyért később Nobel-díjat kapott. Ez a felfedezés nemcsak a fotovoltaiikus technológia fejlődését alapozta meg, hanem új kutatási irányt nyitott a kvantumfizikában is [10].

2.1.2. Félvezető technológia és gyakorlati alkalmazás

A modern félvezető alapú napelemek története az 1940-es évekre nyúlik vissza, amikor Russel Ohl szabadalmaztatta az első szilícium alapú fotovoltaiikus eszközt, a pn-átmenet felfedezése nyomán. Ez a technológiai áttörés alapozta meg a későbbi ipari fejlesztéseket, amelyek közül kiemelkedik az 1954-ben a Bell Laboratories által bemutatott első ipari szilícium napelem. A Chapin, Fuller és Pearson nevéhez fűződő cella mintegy 6%-os hatásfokkal működött, és megbízhatósága révén hamar alkalmazásra került az űrkutatásban [11], [12], [13].

Az 1960-as években az űrprogramok, különösen a NASA műholdas küldetesei, jelentős ösztönzést adtak a fotovoltaiikus technológiák fejlesztésének. A napelemek energiaellátási célú alkalmazása a világűrben új követelményeket támasztott a megbízhatóság, a tömeg és a hatásfok tekintetében. A technológia szélesebb körű alkalmazhatóságát a gyártástechnológia fejlődése – például az integrált áramkörök elterjedése és a cellahibák csökkentése – tette lehetővé, ami megalapozta a földi felhasználás irányába történő elmozdulást is [14].

2.1.3. Szélesebb körű elterjedés és ipari forradalom

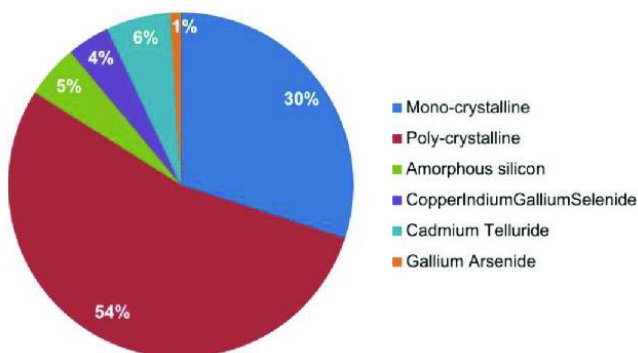
A fotovoltaiikus technológia fejlődését nemcsak tudományos áttörések, hanem gazdasági és geopolitikai tényezők is jelentősen befolyásolták. Az 1970-es és 1980-as évek olajválságai új lendületet adtak a megújuló energiaforrások kutatásának, különösen a napelemes rendszerek fejlesztésének. A kormányzati támogatások és célzott kutatás-fejlesztési programok hatására a napelemek gyártási költsége drasztikusan csökkent: míg az 1970-es évek elején 1 wattnyi teljesítmény előállítása mintegy 100 amerikai dollárba került, ez az érték az évtizedek végére 20 dollár alá esett [15].

Az ezredfordulót követően a napelemek globális kapacitása exponenciális növekedésnek indult, amit nemcsak a technológiai fejlődés, hanem a klímavédelmi célkitűzések és az energiapolitikai átalakulások is ösztönöztek [16]. A fejlesztések fókuszába egyre inkább a hatásfok növelése, a hosszú távú tartósság biztosítása, valamint az anyagkímélő újrahasznosíthatóság és környezetbarát gyártástechnológia került. Ezek a szempontok egyre fontosabbá

váltak az életciklus-elemzés (LCA) alapú értékelésekben is, amelyek a technológia fenntarthatóságát a teljes életút mentén vizsgálják.

2.1.4. Technológiai generációk

A fotovoltaikus technológiák fejlődése három fő generáció mentén írható le, amelyek különböző anyaghasználatot, gyártástechnológiát, energiaigényt, alkalmazási lehetőségeket és környezeti hatásokat képviselnek. Ezen generációk típusainak megoszlását mutatja be a 2. ábra:



33. ábra: Globális piaci eloszlás a különböző napelemtípusok esetében [17]

Első generáció: A mono- és polikristályos szilícium cellák alkotják a jelenlegi globális PV piac alapját. Ezek a technológiák stabil működést, hosszú élettartamot és viszonylag magas, 15–18 (világűri alkalmazás esetén 24%) közötti hatásfokot jelentenek. A szelet-alapú technológia többszáz mikron vastagságot jelent. A kis abszorpciós képesség okán erre az anyagmennyiségre mindenképpen szükség van. Moduláris kialakításuk és megbízhatóságuk lehetővé tette széles körű elterjedésüket lakossági, ipari és közüzemi méretű rendszerekben egyaránt. A technológia folyamatos fejlesztése révén a heteroátmenetes szerkezet struktúrák laboratóriumi körülmények között már 27% körüli hatásfokot is elérnek [18], [19]. Ugyanakkor a gyártás energiaintenzív, és jelentős mennyiségű szilícium alapanyag felhasználásával jár, ami az életciklus korai szakaszában számottevő környezeti terhelést jelent.

Második generáció: A vékonyréteg-technológiák, mint az amorf-szilícium, CdTe és a CIGS, alacsonyabb anyag- és energiaigényű gyártási folyamatokat tesznek lehetővé, ami kedvezőbb környezeti profilt eredményezhet [20], [21]. Az igen magas abszorpciós képesség okán az elsőgenerációshoz képest két nagyságrenddel vékonyabb struktúra is elegendő. Ezek a napelemek közvetlenül üvegre (de esetenként rugalmas hordozókra is) integrálhatók, így új alkalmazási lehetőségeket nyitnak például épületintegrált PV rendszerekben, könnyűszerkezetes épületeken vagy mobil eszközökön. Bár hatásfokuk jellemzően

kissé alacsonyabb a szilícium alapú rendszerekhez képest, a technológia előnyei közé tartozik a sokkal kisebb anyagfelhasználás, (a rugalmasság) és a gyártás egyszerűsége. Némely esetben a ritka és toxikus elemek – például kadmium és tellúr fordulnak elő benne, de a vékony struktúra okán igen kis mennyiségben – jelenléte azonban újrahasznosítási és környezetvédelmi kihívásokat vet fel, különösen a hulladékkezelés és a szabályozási megfelelés terén.

Harmadik generáció: A legújabb fejlesztések célja a hatásfok további növelése, a gyártási költségek csökkentése és az újrahasznosíthatóság javítása. Ebbe a kategóriába tartoznak a perovszkit alapú cellák, szerves félvezetők, (tandem struktúrák) és kvantumponthoz hasonló technológiák. Ezek a rendszerek 30-40% hatásfokot is el tudnak érni, de laboratóriumi körülmények között már 60-80% feletti hatásfokot is elértek, különösen több-átmentes konfigurációkban [22], [23], [24], [25].

Különösen kiemelkedő szerepet töltenek be a koncentrátoros gallium-arzenid (GaAs) alapú napelemek, amelyek a harmadik generáció egyik legfejlettebb és legnagyobb hatásfokú megoldását képviselik. [26] A GaAs egy III-V csoportbeli vegyület-félvezető, amelynek direkt tiltott sávja (bandgap) és magas elektronmobilitása kiváló fotovoltaiikus tulajdonságokat biztosít. A koncentrátoros konfigurációkban – ahol a napfényt optikai elemekkel (pl. Fresnel-lencsék, tükrök) fókuszálják a cellára – a GaAs-alapú több-átmenetes rendszerek 40% feletti konverziós hatásfokra is képesek [27], [28], [29], [30].

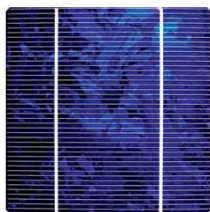
A GaAs cellák különösen alkalmasak űralkalmazásokban, ahol a tömeg, a megbízhatóság és a sugárzásállóság kritikus tényezők. Emellett a technológia potenciált mutat nagy intenzitású napenergia-hasznosításban, például koncentrált PV (CPV) rendszerekben, ahol a rendelkezésre álló felület korlátozott, de a teljesítményigény magas [31].

A GaAs technológia széles körű elterjedését befolyásolja a magas alapanyagköltség, a precíziós gyártástechnológia szükségessége (pl. epitaxiális növesztés). Ezért jött képbe a koncentrátoros megoldás. Ez az új technológia minden bizonnyal hatással van az élettartamra, ami életciklus és hulladékkezelési kihívások elé állítja a szakembereket.

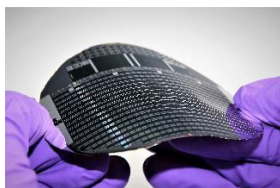
A különböző generációk napelemei a következők (3. ábra):

1. **Monokristályos szilícium cella** [32].
2. **Polikristályos szilícium cella** – az első generáció alapját képezik, magas hatásfokkal és hosszú élettartammal [32].
3. **Gallium-arzenid (GaAs) cella** – koncentrátoros alkalmazásokhoz fejlesztett, kiemelkedő hatásfokú technológia [33].
4. **Kadmium-tellurid (CdTe) cella** – vékonyrétegű megoldás, alacsony anyagigénnyel és kedvező gyártási energiaigénnyel [34].

5. **Perovszkit cella** – harmadik generációs innováció, amely ígéretes hatásfok-növekedést és költségcsökkentést kínál [35].
6. **CIGS (réz-indium-gallium-szelenid) cella** – vékonyrétegű technológia, rugalmas alkalmazási lehetőségekkel [36].
7. **Szerves félvezető (OPV) cella** – könnyű, rugalmas és alacsony gyártási energiaigényű megoldás, bár élettartama korlátozott [37].
8. **Kvantumpontos (QD) cella** – nanoméretű félvezető részecskéken alapuló technológia, amely kiemelkedő spektrális hangolhatóságot és potenciálisan nagyon magas hatásfokot kínál [38].



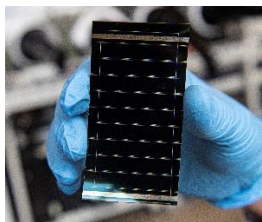
1, 2.



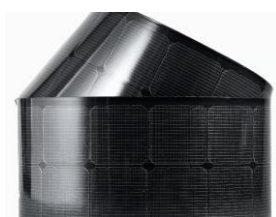
3.



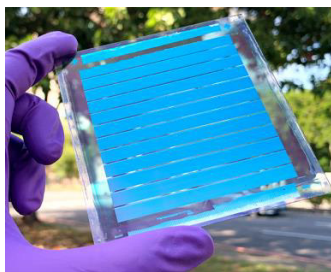
4.



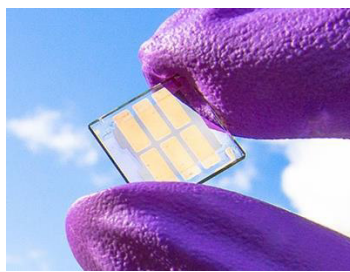
5.



6.



7.



8.

34. ábra: Különböző generációjú napelemcellák

3 Napelemek életciklusa

A fotovoltaikus (PV) rendszerek életciklusának vizsgálata elengedhetetlen a technológia környezeti fenntarthatóságának megítéléséhez. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít a napelemek teljes életútjának – a nyersanyag-kitermeléstől a gyártáson, használaton és újrahasznosításon át a végső ártalmatlanításig – kvantitatív értékelésére. Ez a megközelítés különösen fontos a fenntartható fejlődési célok (SDG 12) eléréséhez, mivel támogatja az erőforrás-hatékonyságot, a hulladékcsoökkentést és a környezeti hatások minimalizálását.

A napelem mint struktúra, többnyire valamilyen kristályos félvezető anyagból van, ami nem degradálódik. A degradáció alapvető oka a tokozás időjárásállósága. A hosszú élettartamra tervezett üveg-EVA-üveg tokozású napelem élettartama az építőipari komponensek élettartamával vetekszik, míg a rövidtávú, csak a profitmaximalizálást szemelőtt tartó gyártás - pl. műanyagtokozás - sok feladatot ad az újrahasznosításnak.

3.1. Életciklus szakaszai

A napelemek életciklusa a „bölcsőtől a sírig” elv alapján öt fő szakaszra bontható [31]:

Nyersanyag-kitermelés és előkészítés: A PV rendszerekhez szükséges alapanyagok – például szilícium, ezüst, alumínium, kadmium, tellúr, réz, indium, gallium, arzén – kitermelése és finomítása jelentős energiaigénnyel és környezeti terheléssel jár [39], [40], [41], [42]. A fenntartható technológiák, mint a glicin alapú lúgos kioldás vagy ionos folyadékok alkalmazása, csökkenthetik a környezeti lábnyomot.

Gyártás: A feldolgozott anyagokból PV cellák és modulok készülnek. Az első generációs szilícium cellák gyártása különösen energiaintenzív, míg a vékonyrétegű technológiák (CdTe, CIGS) és a harmadik generációs megoldások (pl. perovszkit, GaAs) alacsonyabb anyagfelhasználással és hőmérsékleten készülnek. [43], [44]

Használat: A telepített napelemek minden bizonnyal sok-sok évtizeden keresztül működnek. Ugyanakkor a teljesítmény idővel csökkenhet (a kristályos napelemek nem degradálódnak, de a tokozásra használt, időjárásnak, karcosodásnak kitett üvegfedés áteresztőképessége csökkenhet, a vékonyréteg napelemek között létezik olyan struktúra, ami idővel lassan degradálódik) és a környezeti tényezők (UV-sugárzás, szálló por súroló hatása, hőmérséklet, páratartalom) hatással vannak az élettartamra [44].

Leszerelés és újrahasznosítás: Az életciklus végén a panelek leszerelésre kerülnek. A komponensek újrahasznosítása – különösen a szilícium, ezüst és üveg esetében – technológiai kihívás, de kulcsfontosságú a körforgásos gazdaság

szempontjából. A veszélyes anyagokat (pl. Cd, As) biztonságosan kell kezelni [44].

Ártalmatlanítás: A nem újrahasznosítható vagy veszélyes hulladékok megfelelő kezelése elengedhetetlen a környezeti kockázatok csökkentéséhez [44].



35. ábra: Napelemek életciklusa [31]

3.2. Technológiai generációk életciklus-értékelése

A fotovoltaikus technológiák fejlődése három fő generáció mentén követhető nyomon, amelyek eltérő anyaghasználatot, gyártási energiaigényt, környezeti hatásokat és újrahasznosítási lehetőségeket képviselnek. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít ezen technológiák összehasonlító értékelésére, különös tekintettel az energiafogyasztásra, az energia megtérülési időre (EPBT), a globális felmelegedési potenciálra (GWP), valamint a kültéri hatásokra. Az egyes generációk technológiai sajátosságai nemcsak a teljesítményben, hanem a környezeti fenntarthatóságban is jelentős eltéréseket mutatnak, ezért az LCA-alapú összehasonlítás elengedhetetlen a legmegfelelőbb PV rendszer kiválasztásához adott alkalmazási környezetben.

2.3.1. Első generáció – Kristályos szilícium (SC-Si, MC-Si) [45]

- Energiafogyasztás: SC-Si: 19–48 GJ/kW, MC-Si: 19–40 GJ/kW.
- EPBT: SC-Si: 1–4 év, MC-Si: 1–3 év.
- GWP: SC-Si: 40–60 g CO₂-eq/kWh, MC-Si: 30–50 g CO₂-eq/kWh.

- Újrahasznosítás: Vegyi úton történik (HF, HNO₃), az üveg mechanikai és hőkezeléssel választható le.

2.3.2. Második generáció – Vékonyréteg technológiák (CdTe, CIGS) [46]

- Energiafogyasztás: GaAs: 10–20 GJ/kW, CdTe: 3–5 GJ/kW, CIGS: 2–4 GJ/kW.
- EPBT: GaAs: 5.77–6.94 év, CdTe: 0.8–5.05 év, CIGS: 1.87–9.44 év.
- GWP: GaAs: 40–70 g CO₂-eq/kWh, CdTe: 19–30 g CO₂-eq/kWh, CIGS: 20–40 g CO₂-eq/kWh.
- Újrahasznosítás: Cd és Te különböző ipari melléktermékekből nyerhető ki, GaAs gyártása során az As kezelése különös figyelmet igényel.

2.3.3. Harmadik generáció – Új anyagok és koncentrátoros technológiák (GaAs, PSC, OPV, DSSC, QD-SC, CPV) [47]

- Energiafogyasztás: CPV: 4.3–13 GJ/kW, OPV: 4–7 GJ/kW, PSC: 3–6 GJ/kW, DSSC: 2.5–4.8 GJ/kW, QD-SC: 1.5–2 GJ/kW.
- EPBT: CPV: 0.26–0.39 év, PSC: ~0.2 év, OPV: 0.2–4 év, DSSC: ~1.08 év.
- GWP: CPV: 30–50 g CO₂-eq/kWh, PSC: 20–60 g CO₂-eq/kWh, OPV: 5–25 g CO₂-eq/kWh, QD-SC: ~5 g CO₂-eq/kWh.
- Kiemelt technológia – GaAs: A GaAs cellák kiemelkedő hatásfokuk (29–33%) és koncentrátoros alkalmazhatóságuk révén különösen ígéretesek. Ugyanakkor gyártásuk energiaigényes, és az As kezelése komoly környezetvédelmi kihívásokat jelent.

3.3. Fenntarthatósági kihívások és javaslatok

A napelemes rendszerek életciklusának fenntarthatósága számos technológiai, környezeti és gazdasági kihívással szembesül, amelyek az alapanyagok kitermelésétől kezdve a gyártáson és használaton át az újrahasznosításig terjednek. Az alábbiakban részletesen bemutatjuk a legjelentősebb problématerületeket és az ezekre adott válaszokat.

Anyagintenzitás

A PV technológiákban igen kis mennyiségben alkalmazott ritka és toxikus elemek – mint például a kadmium (Cd), arzén (As), ólom (Pb), gallium (Ga), indium (In) és tellúr (Te) – jelentős környezeti és egészségügyi kockázatokat hordoznak. Ezek

az anyagok gyakran melléktermékként keletkeznek más ipari folyamatokban, így kitermelésük és tisztításuk komplex, energiaigényes és veszélyes. A második generációs technológiák (pl. CdTe, CIGS) különösen érintettek, míg a harmadik generációs megoldások (pl. perovszkitek, GaAs) újabb, de szintén kritikus anyagokat használnak. A fenntarthatóság érdekében elengedhetetlen a toxikus komponensek kiváltása bőségesen rendelkezésre álló, nem mérgező alternatívákkal, valamint a zárt körű anyaghasználat és a körforgásos gazdaság elveinek alkalmazása [39].

Energiaigény

A napelemek gyártása – különösen az első generációs kristályos szilícium (SC-Si, MC-Si) és a GaAs-alapú rendszerek esetében – rendkívül energiaintenzív. A szilícium tisztítása, kristályosítása és a cellák előállítása magas hőmérsékletet és jelentős villamosenergia-felhasználást igényel, amelynek környezeti hatása nagymértékben függ a gyártás helyszínének energiamixétől. A GaAs cellák gyártása szintén magas energiaigénnyel jár, különösen a koncentrátoros konfigurációk esetében, ahol optikai elemek és követőrendszerek is szükségesek. A gyártási energia csökkentése érdekében javasolt az alacsony hőmérsékletű, oldat-alapú technológiák (pl. perovszkit, OPV) fejlesztése, valamint a gyártás áthelyezése alacsony szénintenzitású régiókba [39].

Újrahasznosítási infrastruktúra hiánya

A jelenlegi újrahasznosítási kapacitások elsősorban az első generációs szilícium alapú panelekre koncentrálnak, míg a második és harmadik generációs technológiák esetében az újrahasznosítás technológiai és szabályozási keretei még nem kifarrottak. A vékonyrétegű és szerves cellák esetében a komponensek szétválasztása, a toxikus anyagok kezelése és a gazdaságos visszanyerés komoly kihívást jelent. A jövőbeni fejlesztéseknek ki kell terjedniük a moduláris panelek tervezésére, a zárt hurkú anyagáramokra, valamint a regionális újrahasznosítási kapacitások bővítésére [39].

Relatív rövidebb élettartam és degradáció

A harmadik generációs technológiák – különösen a perovszkit (PSC) és szerves (OPV) cellák – esetében gyakori probléma a relatív gyors degradáció, a kisebb stabilitás és a relatív rövidebb működési élettartam. Ez nemcsak a gazdaságosságot, hanem a fenntarthatóságot is veszélyeztetheti, mivel a cserék növelik a hulladék mennyiségét és az anyagfelhasználást. A megoldás a stabilitás növelése, az időjárásállóság javítása, valamint a hosszú távú teljesítménym adatok gyűjtése és elemzése. Emellett szükséges a szabványosított tesztelési protokollok kidolgozása, amelyek valós környezeti körülmények között értékelik a technológiák tartósságát

3.4 Újrahasznosítási stratégiák

A fotovoltaikus (PV) iparág dinamikus növekedése miatt az elkövetkező évtizedekben jelentős mennyiségű napelem-hulladék keletkezik. Az IRENA előrejelzése szerint 2050-re a PV-hulladék mennyisége elérheti a 78 millió tonnát, ami komoly környezeti és gazdasági kihívást [48]. A napelemek újrahasznosítása nem csupán a hulladékkezelés problémáját oldja meg, hanem hozzájárul a kritikus nyersanyagok – például szilícium, ezüst, indium, gallium és tellúr – visszanyeréséhez, valamint a körforgásos gazdaság megvalósításához.

Az újrahasznosítási technológiák három fő lépésre épülnek:

Delaminálás – a modul rétegeinek szétválasztása mechanikai, termikus vagy kémiai módszerekkel.

Anyagok szétválasztása – üveg, fémek, polimerek elkülönítése különböző fizikai és kémiai eljárásokkal.

Tisztítás és finomítás – a visszanyert anyagok tisztítása és előkészítése újrafelhasználásra [49]

A folyamatok megvalósítása során alkalmazott módszerek lehetnek mechanikai (darálás, szeparálás), termikus (500–650 °C-os hevítés) és kémiai (savak, oldószerek, szuperkritikus CO₂) eljárások. A választott technológia függ a modul típusától és a visszanyerni kívánt anyagoktól.

Kristályos szilícium (c-Si) modulok

A kristályos szilícium alapú modulok a PV-piac több mint 70%-át teszik ki, így újrahasznosításuk kiemelt jelentőségű.

Mechanikai módszerek: a keretek és kábelek eltávolítása után a modulokat darálják, majd optikai és légáramos szeparálással választják szét az üveget, alumíniumot és réz komponenseket. Előnye a vegyszermentesség és alacsony környezeti kockázat, hátránya viszont az alacsony tisztaság és hozam (kb. 85%) (EPRI & NREL, 2018).

Termikus-kémiai módszerek: a polimerek eltávolítása hevítéssel (450–650 °C), majd savas kioldás (HNO₃, HF, NaOH) révén akár 95%-os anyagvisszanyerés érhető el, magas tisztaság mellett [50].

Innovációk: a szuperkritikus CO₂ alkalmazása gyors és környezetbarát delaminálást biztosít, 96%-os üveg-visszanyeréssel, miközben elkerüli a toxikus gázok képződését [51].

Vékonyfilm technológiák (CdTe, CIGS)

A második generációs vékonyfilm modulok újrahasznosítása különösen fontos a ritka és toxikus elemek (Cd, Te, In, Ga) miatt.

Ipari gyakorlat: a First Solar eljárása aprítást és savas kioldást ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$) kombinál, így a Cd és Te visszanyerése 95%-os hatékonysággal történik [52].

EU-LIFE RESOLVED projekt: vákuum blasting és oxidáló savas kezelés alkalmazása, amely akár 99,99%-os hatékonyságot biztosít [53]. A kihívások közé tartozik a magas energiaigény, a vegyszerek környezeti kockázata és a gazdasági megtérülés korlátozott volta.

Organikus és új generációs technológiák

Az organikus PV modulok esetében a kutatás még kezdeti fázisban van. Az alkalmazott módszerek között szerepel az alacsony energiaigényű vízben diszpergálás és szerves oldószeres öblítés [54], valamint az ezüst visszanyerése égetés és savas kezelés révén [55]. A gallium-arszenid (GaAs) cellák újrahasznosítása főként pirolízis és vákuum-metallurgia alkalmazásával történik, amely 93%-os gallium-visszanyerést biztosít [56]. A perovszkit technológia esetében ígéretes megoldás a zárt hurkú újrakristályosítás butilamin segítségével, amely 98,9%-os hatékonyságot ér el, valamint a kationcserés gyanta alkalmazása az ólom eltávolítására [57], [58].

Festékkézenyített cellák (DSSC)

A DSSC modulok újrahasznosítása jelenleg korlátozott, mivel a cellák kompakt szerkezete megnehezíti az anyagok szétválasztását. A mechanikai aprítás és pirometallurgiai eljárások alkalmazhatók, de a fémkinyerési hatékonyság alacsony [59].

Gazdasági és környezeti megfontolások

Az újrahasznosítás környezeti előnyei egyértelműek: a CO_2 -kibocsátás és a toxikus anyagok környezeti terhelése jelentősen csökken. Egy LCA-elemzés szerint a CdTe modulok újrahasznosítása az energiaigényt 81 MJ/m^2 -ről 12 MJ/m^2 -re, a CO_2 -kibocsátást pedig 6 kg/m^2 -ről $2,5 \text{ kg/m}^2$ -re csökkenti [60]. Gazdasági szempontból a jelenlegi költségek $0,08$ – $0,11 \text{ USD/W}$ tartományban mozognak, ami hosszú távon versenyképessé teheti az újrahasznosítást [61]. Ugyanakkor a komplex technológiák és a vegyszerek használata miatt a gazdasági megtérülés még korlátozott, különösen a ritka anyagokat tartalmazó modulok esetében.

Az újrahasznosítási stratégiák fejlődése kulcsfontosságú a PV ipar fenntarthatósága szempontjából. A kristályos szilícium technológia újrahasznosítása a legfejlettebb, míg az új generációs technológiák (organikus, perovszkit) esetében további kutatás szükséges. Bár a módszerek többsége energiaigényes és vegyszereket használ, a környezeti előnyök – például a CO₂-kibocsátás csökkentése és a kritikus anyagok visszanyerése – egyértelműek. A jövőben a gazdasági megtérülés javítása, az energiahatékonyság növelése és a szabályozási keretek kialakítása lesz meghatározó.

4 Összefoglalás

A fotovoltaikus technológia térnyerése meghatározó szerepet játszik a globális energiarendszerek dekarbonizációjában, ugyanakkor jelentős környezeti és gazdasági kihívásokat vet fel. Az életciklus-elemzés (LCA) módszertana lehetőséget biztosít a napelemek teljes életútjának vizsgálatára, amely magában foglalja a nyersanyag-kitermelést, a gyártást, az üzemeltetést és az életciklus végén történő kezelést. Az újrahasznosítás kulcsfontosságú a körforgásos gazdaság megvalósításában, mivel hozzájárul a kritikus nyersanyagok visszanyeréséhez és a hulladék minimalizálásához.

Az újrahasznosítási stratégiák technológiáinként eltérőek, de alapvetően három lépésre épülnek: delaminálás, anyagok szétválasztása és tisztítás. A kristályos szilícium alapú modulok esetében mechanikai, termikus és kémiai módszerek kombinációja alkalmazható, míg a vékonyrétegű technológiák esetében a ritka és toxikus elemek biztonságos kezelése jelent kihívást. Az új generációs megoldások, mint a perovszkit és a GaAs-alapú cellák, ígéretesek a hatásfok és költségcsökkentés szempontjából, azonban újrahasznosításukhoz innovatív eljárások szükségesek.

A fenntarthatóság érdekében elengedhetetlen a szabályozási keretek fejlesztése, az újrahasznosítási infrastruktúra bővítése és a gyártói felelősség erősítése. A jövő kulcsa az energiahatékony gyártás, a toxikus anyagok kiváltása és a körforgásos gazdaság elveinek következetes alkalmazása.

Források

- [1] Global Electricity Review 2025 <<https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025>> ; 2025
- [2] Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Population based on various sources (2024) – with major processing by Our World in Data. “Coal consumption per capita” [dataset]. Energy Institute, “Statistical Review of World Energy”; Various sources, “Population” [original data].

- [3] IEA (2025), Global Energy Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>, Licence: CC BY 4.0
- [4] R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Raugei, M. Stucki, 2020, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020.
- [5] Hernández-López Daniela-Abigail, Marisela I. Vega-De-Lille, Julio C. Sacramento-Rivero, Carmen Ponce-Caballero, Amina El-Mekaoui, Freddy Navarro-Pineda: Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy, Renewable Energy Focus, Volume 51, 2024, 100649, ISSN: 1755-0084, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100649>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008424001133>>
- [6] Zahedi, Rahim, Moosavian, Seyed Farhan, Aslani, Alireza, Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using the LCA approach, Energy Science & Engineering, Volume 10, ISSN: 2050-0505, <<https://doi.org/10.1002/ese3.1294>>
- [7] W.W. Anderson, Y.G. Chai, Becquerel effect solar cell, Energy Conversion, Volume 15, Issues 3–4, 1976, Pages 85-94, ISSN 0013-7480, <[https://doi.org/10.1016/0013-7480\(76\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90020-6)>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013748076900206>>
- [8] Charles Fritts: Effect of Light on Selenium During the Passage of An Electric Current, Nature 7, 303 (1873). <<https://doi.org/10.1038/007303e0>>
- [9] Gevorkian, P. Sustainable Energy System Engineering: The Complete Green Building Design Resource, McGraw-Hill Education, 2007
- [10] Deambi, Suneel. *Solar PV Power: A global perspective*. The Energy and Resources Institute (TERI), 2011.
- [11] Atib Mohammad Oni, Abu S.M. Mohsin, Md. Mosaddequr Rahman, Mohammed Belal Hossain Bhuiyan, A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells, Energy Reports, Volume 11, 2024, Pages 3345-3366, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.007>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724001525>)

- [12] Hoang, Samantha. "The environmental history of solar photovoltaic cells." (2017).
- [13] Smith, K. D., et al. "The solar cells and their mounting." *Bell System Technical Journal* 42.4 (1963): 1765-1816.
- [14] Kamal, Neel, and K. P. Singh. "Research Review of Solar Photovoltaic Electrical Power Generation." *Ge-International Journal of Engineering Research* 2.8 (2014): 47-57.
- [15] J. Garofalo, An electricity regulation primer—the history of electricity regulation in the United States, *Available at SSRN* 3974880, 2021, doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3974880>.
- [16] Green, Martin A., et al. "Solar cell efficiency tables (version 39)." *Progress in photovoltaics: research and applications* 20.1 (2012): 12-20.
- [17] G. Moreno, W. Emilio, Ullmann, Andressa, dos Santos, Litiéle, Lourega, Photovoltaic Solar Energy: Is It Applicable in Brazil? –A Review Applied to Brazilian Case, *Materials and Geoenvironment* Volume 66, 10.2478/rmzmag-2019-0012
- [18] Ayman Mdallal, Ahmad Yasin, Montaser Mahmoud, Mohammad Ali Abdelkareem, Abdul Hai Alami, Abdul Ghani Olabi, A comprehensive review on solar photovoltaics: Navigating generational shifts, innovations, and sustainability, *Sustainable Horizons*, Volume 13, 2025, 100137, ISSN 2772-7378, <<https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100137>>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737825000070>>
- [19] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, *Solar Energy*, Volume 85, Issue 8, 2011, Pages 1580-1608, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1000366X>)
- [20] H. Kim, K. Cha, V.M. Fthenakis, P. Sinha, T. Hur, Life cycle assessment of cadmium telluride photovoltaic (CdTe PV) systems, *Sol Energy*, 103 (2014), pp. 78-88, 10.1016/j.solener.2014.02.008
- [21] A.M. Bagher, M.M.A. Vahid, M. Mohsen, Types of solar cells and application, *Am J Opt Photon*, 3 (5) (2015), pp. 94-113, [10.11648/j.ajop.20150305.17](https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17)
- [22] B. O'Regan, M. Grätzel A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films *Nature*, 353 (6346) (1991), pp. 737-740, [10.1038/353737a0](https://doi.org/10.1038/353737a0)

- [23] T.A. Chowdhury, M.A.B. Zafar, M.-S.-U. Islam, M. Shahinuzzaman, M.A. Islam, M.U. Khandaker Stability of perovskite solar cells: issues and prospects RSC Adv, 13 (3) (2023), pp. 1787-1810, [10.1039/D2RA05903G](https://doi.org/10.1039/D2RA05903G)
- [24] W.-C. Chang, D.-H. Lan, K.-M. Lee, X.-F. Wang, C.-L. Liu, Controlled deposition and performance optimization of perovskite solar cells using ultrasonic spray-coating of photoactive layers ChemSusChem, 10 (7) (2017), pp. 1405-1412, [10.1002/cssc.201601711](https://doi.org/10.1002/cssc.201601711)
- [25] G. Li, R. Zhu, Y. Yang, Polymer solar cells, Nat Photon, 6 (3) (2012), pp. 153-161, [10.1038/nphoton.2012.11](https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.11)
- [26] N. Papež, L. Škvarenina, P. Tofel, and D. Sobola, Thermal stability of gallium arsenide solar cells, vol. 10603, pp. 251-256, 2017, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2292673>.
- [27] A.K. Pandey, V.V. Tyagi, J.A.L. Selvaraj, N.A. Rahim, S.K. Tyagi, Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications Renew Sustain Energy Rev, 53 (2016), pp. 859-884, [10.1016/j.rser.2015.09.043](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.043)
- [28] S. P. Philipps, A. W. Bett, K. Horowitz, and S. Kurtz, "Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology," United States, 2015, <<https://www.osti.gov/biblio/1351597>>
- [29] N. Papež, R. Dallaev, Ş. Tălu, J. Kaštyl, Overview of the current State of gallium arsenide-based solar cells Materials, 14 (11) (2021), [10.3390/MA14113075](https://doi.org/10.3390/MA14113075)
- [30] Á. Nemcsics, Napelemek és nanostruktúrák – az űrtechnikára fejlesztett technológiák szilárd tudományos hátteret biztosítanak a földi alkalmazású napelemfejlesztéseknek, 2025, <<https://www.innoteka.hu/cikk/napelemek-es-nanostrukturak-az-urtechnikara-fejlesztett-technologiak-szilard-tudomanyos-hatteret-biztositanak-a-foldi-alkalmazasu-napelemfejlesztéseknek.3214.html>>
- [31] P.A. Davies, J.C. Miftano, A. Luque, F. López and J.M. Ruiz, Calculations of efficiencies achievable using gallium arsenide and silicon cells mounted together in cavities illuminated by single-stage concentration, Solar Energy Materials and Solar Cells 26 (1992) pp. 203-215
- [32] Finn Peacock, Polycrystalline vs. Monocrystalline Solar Panels, Solarquotes, <<https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline>>

- [33] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, and A. W. Bett, “68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance,” *Phys. Status Solidi RRL* 15, 2100113 (2021). <https://doi.org/10.1002/pssr.202100113>, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/record-efficiency-68-9-percent-for-gaas-thin-film-photovoltaic-cell.html>>
- [34] Solar Consultant, Cadmium Telluride Solar Cells, <https://solarconsultant.ca/cadmium-telluride-solar-cells>>
- [35] U.S. Department of Energy, Perovskite Solar Cells, <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>>
- [36] The Ultimate Guide to Thin-Film 2025 <
<https://www.eossolarsolutions.co.uk/solar-explained/thin-film-solar-panels>>
- [37] Chuang-Yi Liao, et al., [Photoactive Material for Highly Efficient and All Solution-Processed Organic Photovoltaic Modules: Study on the Efficiency, Stability, and Synthetic Complexity](#), *Solar RRL* (2021). DOI: 10.1002/solr.202000749
- [38] Dexter Johnson, Quantum Dot Solar Cells Break Conversion Efficiency Record MIT researchers get 9-percent conversion efficiency out of quantum dot solar cells produced through solutions processes, 2014, <https://spectrum.ieee.org/quantum-dot-solar-cells-break-conversion-efficiency-record>>
- [39] Arefin Ittesafun Abian, Sami Azam, David Ompong, Deepika Mathur, Comprehensive review of the material life cycle and sustainability of solar photovoltaic panels, *Solar Energy*, Volume 301, 2025, 113927, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113927>., <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25006905>>
- [40] E. Klugmann-Radziemska, A. Kuczyńska-Łażewska, The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production – a life cycle assessment of environmental impacts, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 205 (2020), Article 110259
- [41] N.A. Ludin, *et al.*, Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 96 (2018), pp. 11-28

- [42] M. Daryabor, A. Ahmadi, H. Zilouei, Solvent extraction of cadmium and zinc from sulphate solutions: comparison of mechanical agitation and ultrasonic irradiation, *Ultrason. Sonochem.*, 34 (2017), pp. 931-937
- [43] C. Deferm, *et al.*, Purification of indium by solvent extraction with undiluted ionic liquids, *Green Chem.*, 18 (14) (2016), pp. 4116-4127
- [44] V. Muteri, *et al.*, Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels, *Energies*, 13 (1) (2020), p. 252
- [45] D. Huang, T. Yu, Study on energy payback time of building integrated photovoltaic system, *Proc. Eng.*, 205 (2017), pp. 1087-1092
- [46] A. Maalouf, *et al.*, A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 186 (2023), Article
- [47] 113652B. Lee, D. Fan, S.R. Forrest, A high throughput, linear molecular beam epitaxy system for reduced cost manufacturing of GaAs photovoltaic cells: will GaAs ever be inexpensive enough?, *Sustain. Energy Fuels*, 4 (4) (2020), pp. 2035-2042
- [48] Zita Ngagoum Ndalloka, Harigovind Vijayakumar Nair, Samuel Alpert, Cordula Schmid, Solar photovoltaic recycling strategies, *Solar Energy*, Volume 270, 2024, 112379, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112379>, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X24000732>>
- [49] J. Tao, S. Yu, Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 141 (2015) 108–124, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.005>.
- [50] W.H. Huang, W.J. Shin, L. Wang, W.C. Sun, M. Tao, Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules, *Sol. Energy* 144 (2017) 22–31, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.001>.
- [51] E. S. Lovato, L. M. Donato, P. P. Lopes, E. H. Tanabe, and D. A. Bertuol, “Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials,” *J. CO₂ Util.*, vol. 46, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101477.
- [52] F. Solar, The recycling advantage, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 19 (5) (2017), pp. 614–626.

- [53] W. Berger, F.G. Simon, K. Weimann, E.A. Alsema, A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules, *Resour. Conserv. Recycl.* 54 (10) (2010) 711–718, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.001>.
- [54] Y. Zhou et al., Recyclable organic solar cells on cellulose nanocrystal substrates, 2013. doi: 10.1038/srep01536.
- [55] R.R. Søndergaard, Y.S. Zimmermann, N. Espinosa, M. Lenz, F. Krebs, Incineration of organic solar cells: Efficient end of life management by quantitative silver recovery, *Energy Environ. Sci.* 9 (3) (2016) 857–861, <https://doi.org/10.1039/c6ee00021e>.
- [56] L. Zhan, F. Xia, Y. Xia, B. Xie, Recycle Gallium and Arsenic from GaAs-Based EWastes via Pyrolysis-Vacuum Metallurgy Separation: Theory and Feasibility, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6 (1) (2018) 1336–1342, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03689>.
- [57] X. Feng, et al., Close-loop recycling of perovskite solar cells through dissolution-recrystallization of perovskite by butylamine, *Cell Reports Phys. Sci.* 2 (2) (2021) 100341, <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100341>.
- [58] B. Chen, C. Fei, S. Chen, H. Gu, X. Xiao, J. Huang, Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules, *Nat. Commun.* 12 (1) (2021) 1–10, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26121-1>.
- [59] K. Miettunen, A. Santasalo-Aarnio, Eco-design for dye solar cells: From hazardous waste to profitable recovery, *J. Clean. Prod.* 320 (April) (2021) 128743, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128743>.
- [60] M. Held, Life cycle assessment of CdTe module recycling, *Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.* (September) (2009), pp. 21–25.
- [61] V.M. Fthenakis, End-of-life management and recycling of PV modules, *Energy Policy* 28 (14) (2000) 1051–1058, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00091-4).