

A szilícium alapú napelem menthet meg a kihalástól?

Ritter Csaba¹, Kecskeméti Zsombor², Varga Zoltán^{3,4}, Dr. Rácz Ervin⁵

¹ Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar (villamosmérnök B.Sc. hallgató), Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, rittcsabi@gmail.com

² Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnök Kar (villamosmérnök B.Sc. hallgató), Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, zsomborkecskemeti@gmail.com

³ Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika Doktori Iskola (PhD hallgató) 1034 Budapest, Bécsi út 96/B, varga.zoltan@uni-obuda.hu

⁴ Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, varga.zoltan@uni-obuda.hu

⁵ Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, racz.ervin@uni-obuda.hu

A XXI. században a környezetvédelem az egyik legfontosabb téma, amely a Földünket foglalkoztatja. A tiszta energia az, ami akár a bolygónk jövőjét is jelentheti. A földben található szén, olaj és a földgáz alapú fosszilis tüzelőanyagok nem tudják a végtelenségig ellátni a bolygónkat villamosenergiával, ezért ennek a kiküszöbölésén dolgoztak a kutatók és mérnökök évtizedeken át, amíg végül felfedezték, hogyan tudják a naptól jövő energiát villamos energiatermelésre fordítani. Napjainkban a leggyorsabban fejlődő és bővülő energiatermelő egységek a napelem panelek. Ezek a működésük közben nem, vagy kevésbé bocsátanak ki káros anyagot. Ilyen mértékű káros anyag kibocsátás csupán a tisztán tartása által keletkezhet. A több évtizedes hatékony termeléshez elengedhetetlen a panelek karbantartása, tisztítása. Tudományos munkánkban részletesen bemutatjuk a szilícium alapú napelemek készítését [1], és az élettartamuk utáni újrahasznosítását. Szó fog esni az újrahasznosítás fontosságáról és fajtáiról is [2]. Az elhasznált napelem veszélyes hulladéknak minősül, amely rossz helyen, illetve kezeken súlyosan szennyezheti a környezetünket [2]. Cikkünkben közelebbről ismertetjük a napelemek gyártását és az elhasznált napelem panelek újrahasznosításának folyamatát. Betekintést nyújtunk a napelem panel előállításába és ismertetjük a későbbi amortizációját, a felhasználás utáni folyamatokat.

Kulcsszavak: PV; napelem, Si, újrahasznosítás

1. Bevezető

A XXI. század rohanó világában egy létfontosságú téma a környezetvédelem. Ezen belül pedig a tiszta energia, amely akár a bolygónk jövőjét is jelentheti. A földben található fosszilis tüzelőanyagok, mint a szén, az olaj és a földgáz nem tudják a végtelenségig ellátni a bolygónkat villamosenergiával, erre lehet megoldás a napelem.

Cikkünkben bemutatjuk, hogy a napelem (mono- és polikristályos napelem) milyen technológia felhasználásával készül el, illetve életciklusa végén milyen újrahasznosítási eljárásokat kell alkalmazni.

2. Napelemek és fajtái

Napjainkban a napelem panel az egyik leggyorsabban fejlődő megújuló alternatív energiatermelő egység. A panelek működésük közben nem, vagy kevésbé bocsátanak ki káros anyagot. Ilyen káros anyag kibocsátás a tisztán tartása által keletkezhet. Egy karbantartott napelem – a gyártástechnológiájától függően - akár több évtizedig is kitűnően tud működni, mindössze pár százalékos veszíthet hatékonyságából. Mint legnépszerűbb zöldenergia típus, a napból a Földre körülbelül 174 petawatt energia érkezik, amely azt jelenti, hogy egy a Földre jutó egy óra napsugárzás energiája sokkal több, mint azaz energiamennyiség, amit az emberiség egy egész év alatt felhasznál.

A szilícium alapú napelemeket kettő nagy csoportba lehet osztani alapanyag szerinti felosztás esetén:

- kristályos napelem
- vékonyfilm-rétegű napelem fajtákra.

A kristályos szilícium alapú napelem tovább bontható két csoportra:

- monokristályos napelem
- polikristályos napelem.

A legmodernebb, legújabb technológiának a kristályos napelem számít a piacon. Ezek gyártása nagy tisztaságú szilícium cellákból készül, illetve sorba kötve, vízmentesen egy műanyag hátlap és egy üveglap közé laminálva kerül elkészítésre. A monokristályos cellák esetén a szilícium egy egész tömbben dermed meg, illetve henger alakúra húzzák ki az anyagot egy elektromos térben. A polikristályos cellákat négyzet alakú tömbökbe öntik és több kristályban dermed meg. Viszonylag könnyű megkülönböztetni a mono- és polikristályos napelemeket

az amorf napelemektől, mert legtöbbször a polikristályos négyzet alakú és a monokristályos nyolcszög alakú cellákban helyezkednek el.

Az említett napelem esetén hordozható napelem kivitel is létezik, amelyet úgy készítenek, hogy a gyártás során egy hajlítható hordozó rétegekre gözölük fel a félvezető rétegeket. Az említett hajlítható hordozóra rétegre felgőzölt napelemek a vékony rétegű napelemek, amelyek hatásfoka 5-8% közé esik. A hatásfokuk megközelíti a kristályos napelemeket (körülbelül 12%). A vékonyréteg napelemek előnye, hogy háromszor kevesebb hely felületet foglalnak el a mono- és polikristályos napelemes rendszerekhez képest.

3. Előállítási folyamatok

Mind a monokristályos, mind a polikristályos napelemeknek esetén a cellák alkotóeleme szilícium (Si), amit nagy tisztaságú szilícium-dioxidból nyerünk. A napelem cellának, hogy alkalmas legyen az előállításra egy hosszú gyártási folyamaton kell végig mennie. Az előállítás több lépcsős, amelynek a lépései: 1.) Szilícium polikristály (vegytisztá) előállítása 2.) Kristályhúzás 3.) A kristály felületének csiszolása 4.) Szeletelés 5.) Élek lekerekítése 6.) Szeletek simítása 7.) Polírozás 8.) Szeletek tisztítása 9.) Lézeres felülvizsgálás 10.) Epitaxális rétegnövesztés

Az első főbb feladat, hogy a szilícium-dioxidból el kell távolítani az oxigént, amit egy nagy olvasztómedencében, szén hozzáadásával érnek el. Ez a folyamat magas hőmérsékleten történik (kb. 2000 °C), ezután a szén megköti az oxigént és létrejön a CO₂ (szén-dioxid), mint melléktermék. A folyamat végén 99%-os tisztaságú szilíciumot kapunk, amelyet a következő lépésben oxigén-kloriddal oxidálnak, újra tisztítják. Ezáltal ki tudják tisztítani a maradék kalciumot, alumíniumot, bórt, vasat és foszfort. Az említett folyamatok energiaigényesek, ugyanis 300-1100 °C közötti hőmérséklet szükséges ezen kémiai folyamatoknak a lefolyásához. A napelemcella gyártáshoz minimum 6 N, vagyis 99,999999% tisztaságú szilícium szükséges. Következő lépésként a megkapott olvadékot ledarálják egészen apróra, majd újra megolvasztják és egy napelemcellához szükséges tisztaságú és méretű, megfelelő kristályszerkezetű tömböket alakítanak ki. A tömbösítéshez az iparban régóta használatos kiforrt módszert alkalmazzák, a Czochralski-eljárást. Ezen folyamatot Jan Czochralski találta fel, amelynek legfontosabb alkalmazása az egykristályos szilícium nagy hengeres rudjainak a növesztése. Ezen folyamat széleskörben elterjedt, az elektronikai iparban félvezető eszközök gyártásánál is alkalmazzák.

Szilícium tömbösítése

A monokristályos szilícium alapú napelem esetén a szilícium tömbösítését követően a megkapott szilíciumhengereket gyémántszemcsés huzalosvágó berendezésekkel szöglestesítik, majd felszeletelik 160 - 210 mikrométer vastagságú lapkákká.

A polikristályos szilícium alapú napelem esetén egy nagyobb kád formájú kemencében több pontból kiindulva növesztik ki a szilíciumkristályokat. A nagy tömböket ezután 1100 °C-on, - ami alacsonyabb a Czochralski módszernél az alkalmazott hőmérséklet - nagyobb méretben történik a szilícium tömbösítése. Ezután a nagy tömböket, kisebb részekre szeletelik fel, viszont a vágási vonalak nem esnek egybe a kristályok széleivel. Az így kapott szilíciumlapkákon akár több szilíciumkristály kisebb” darabjai” is megtalálhatók. Ezek felhasználásával készül el a polikristályos napelemcellák. A megmaradt polikristályos lapkákon, teljesen jól kivehetőek a kristályok közötti határvonalak.

4. A napelemek utóélete

A napelemek a változó időjárási körülményeike jól bírják. Ez többnyire a gyártástechnológiának köszönhető, illetve a napelemek anyagainak úgy, mint alumínium, edzett üveg. További előnye, hogy nem tartalmaznak forgó, kopó alkatrészeket, amik az elhasználódásában időben előrevinnék. A megfelelő telepítés és üzemeltetés esetén a degradációjuk minimális. Az esetek egy bizonyos részében előfordulhat, hogy külső beavatkozás által rongálódik meg egy panel az élettartama lejárta előtt. Ilyen speciális esetek a balesetek, illetve a természeti katasztrófák. Az ilyen megrongálódott darabokat ugyan úgy újra lehet hasznosítani, mint az életciklusa végén járó elemeket, függetlenül attól, hogy milyen sérülés érte őket [7].

Nem kizárt, hogy legyártásuk és üzembehelyezésük után több hiba is kialakulhat a napelem panelekben. Korábbi kutatások kimutatták, hogy a napelemek meghibásodásának 40%-a, összeköthető mikroszkopikus nagyságú repedésekkel, törésekkel és hibákkal. Ezt a magas százalékos arányt próbálták csökkenteni, ezért 2008-ban új, vékony cellás paneleket kezdtek el gyártani.

Mivel a napelemek az elmúlt évtizedekben kezdtek el robbanás szerűen fejlődni, ezért még nem keletkezett számottevő elhasználódó napelem panel. A kutatók a tömeges meghibásodásukat a század közepére jósolják.

A szilícium alapú napelem panelekben olyan nehézfémek találhatóak, amelyek a természetre igen káros hatást gyakorolnak, emiatt az elhasználódott elemeknek kiemelten fontos az újrahasznosítása. Az Európai Unió törvényeket fogalmazott meg az elhasználódott panelekre. Ezen megfogalmazott törvények alapján, az Európai Unió tagállamok 2014-től kiemelten szigorúan veszik a

napelemek begyűjtését és felhasználását. Kötelezővé tették a cégeknek az ingyenes visszavételt és szállítást, akiknek követni kell a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) által előírt szabványokat (2012/19/EU).

Ez az első szabályozás, ami kimondja, hogy a napelemek és más elektronikai felszerelések – úgy mint, a telefon, a tablet és az akkumulátor - veszélyes hulladéknak minősülnek és különleges eljárasmódot igényelnek az élettartamuk után.

Továbbá, a jelenlegi Európai WEEE irány csökkenti kívánja a globális klímaváltozást és az ökológiai lábnyomot a napelemek gyártásánál, ami körülbelül 16 kg CO₂ (szén-dioxid) elsődlegesen nem megújuló energiaforrással egyenértékű. Nagyobb mértékben pedig, 1 tonna újrahasznosított szilícium alapú napelem panel képes megtakarítani 800 kg CO₂-tól egészen 1200 kg CO₂ –ig terjedő intervallumban, abban az esetben, ha az anyag 100%-ban első osztályú összetevőből áll össze.

Ahhoz, hogy ezeket a számokat elő tudják állítani, először is az összes szilícium alapú (monokristályos (c-Si), polikristályos (p-Si), amorf (a-Si) és vékonyrétegű (CIGS, CdTe) paneleket újra kell hasznosítani.

A fentebb említett napelemeket tömören három lépés szerint lehet újrahasznosítani:

- 1. Mechanikai, kémiai vagy hőkezeléses eltávolítással szétbontjuk a paneleket*
- 2. Kémiai bevonatot eltávolítjuk a rétegről*
- 3. Kivonjuk a kémiai összetevőket.*

Ezek a fázisok a különböző működésen alapuló napelem panelek újrahasznosítására vonatkozik, különösen:

- A mono- és polikristályos napelemek szétbontását pirolízissel végezzük el, hogy visszanyerjük a szilícium darabokat [9].
- A CIGS szolár cellák hő és kémiai kezeléssel megy keresztül, hogy kinyerjék a ritkafémeket (gallium, indium, szelén) és az üveget [9].
- Az amorf napelem cellákat mechanikai kezeléssel bontják darabjaira [9].

Részletezve bemutatásra kerülnek a cégeknél és üzemeknél leginkább elterjedt újrahasznosítási eljárások szilícium és a vékonyréteg alapú napelemek esetén.

4.1 Szilícium alapú napelem újrahasznosítása

Ennél az eljárásnál a már korábban összegyűjtött napelemeket, üveg és fém darabjaira bontják szét. A folyamatnál az üveg 95%-át, míg a fém alkatrészeket teljesen be tudják építeni az újrahasznosított cellákba. A fennmaradó összetevőket egy 500°C-ra felhevített kemencébe helyezik el, és addig melegítik, amíg szét nem tudják szedni az összeragasztott elemeket. Ennek a hevítésnek a következményeképpen a kapszulán maradó műanyagok teljesen leolvadnak és a szilícium cellák készen állnak a további munkálatokra, hogy a későbbiekben teljesen formázható legyen. A kifejlesztett technológia lehetővé teszi, hogy az elvált műanyag darabok ne a szemétként kerüljenek, hanem az elvált darabokat a kemence fűtésénél újra tudják használni, ezáltal nem keletkezik számot tevő hulladék, ami termeli a környezetet. A hőkezelés után a modulok fizikailag elkülönülnek. Ezeknek a moduloknak a 80%-át újra tudják használni, míg a fennmaradó részt tovább finomítják. A szilícium darabkákat kémiai úton megtisztítják, eltávolítják a felesleges szennyeződések a felületről. A megtisztított darabokat ismét a felhevített kemencébe helyezik, ahol megolvassztják őket és új modulokat öntenek. Ennek az eljárásnak az eredményeképpen a szilícium 85%-át újra tudják hasznosítani.

4.2 Vékonyréteg alapú napelem újrahasznosítása

Összehasonlítva a kristályos szilícium alapú napelem újrahasznosításával, ez a módszer jóval drasztikusabb és bonyolultabb. Az első lépésben a napelemeket egy szeletelő gépbe helyezik, ahol 4-5 milliméternél kisebb darabokra vágják. Ügyelnek arra, hogy a laminálás tartsa össze a belső alkatrészeket, amit a későbbiekben eltávolítanak. Ellentétben a kristályos szilícium alapú panelekkel, a maradék anyagok szilárd és folyékony halmazállapotból állnak. Annak érdekében, hogy elkülönítsék ezeket egymástól, forgódobos rendszerben a szilárd anyagokat bent tartják, amíg a folyadék a szitán át egy tartályba ki nem folyik.

A folyadékkal teli tartályok ezután egy fertőtlenítő folyamaton mennek keresztül, ami segítségével még jobban megtisztítják a folyadékot a lerakódott szennyeződéstől. Az így kapott folyékony anyagból kivonják az egymástól különböző félvezető testeket. Ezen lépést jelentősen meghatározza az adott üzemi fejlettségi szintje, viszont elmondható, hogy átlagosan a félvezető testek 95%-át újra fel tudják használni a további gyártások során. A szilárd halmazállapotú testek réteganyagokkal vannak szennyezve, amelyek tömege könnyebb, ezért a szennyeződések egy vibráló gép segítségével tudják eltávolítani. Végezetül az elkülönített testek egy öblítésen mennek keresztül, hogy megtisztítsák a lerakódott szennyeződésektől. A végeredmény pedig a tiszta üveg, amit 90%-os arányban tudnak felhasználni az újra gyártás közben [8] [10] [11]. Az újrahasznosító folyamatok mellett sokakban felmerülhet, hogy milyen más előnyökkel jár a környezet szempontjából feltéve, ha van. A megfelelően kidolgozott infrastruktúrának nem szabad gondot okoznia a jövőben ugrásszerűen megnövekedő, újrahasznosításra váró napelemek számára. Ez az emelkedés a gyárak terjeszkedését, új üzemek nyitását jelentheti, ami segít a térség munkaerőhiányának csökkentésében. Nem

csak a fotovillamos újrahasznosítás által megnövekedett munkahelyek száma fog több előnnyel járni, hanem nagyjából 11 milliárd font értékű lesz az újrahasznosított anyagok összértéke 2050-re. Ez lehetővé teszi, hogy 2 milliárd új napelem panelt gyártsanak, anélkül, hogy a Földben lévő nyersanyagokat felhasználják. Továbbá, ez azt is jelenti, hogy képesek leszünk 630 gigawatt villamosenergia termelésére, csak újrahasznosított, korábban már használt napelemből. Ezeket a napelemeket „double green” -nek is nevezik, mivel már egyszer újra lettek építve más, korábban leamortizálódott vagy újrahasznosított napelem panelekből.

5. Gazdasági nézet

Gazdasági szempontból nézve a kristályos szilícium alapú (mono- és polikristályos) napelem panelek uralják a napelem piac jelentős részét. Ezek a panelek (c-Si, p-Si) olcsóbb anyagokból állnak össze és az újrahasznosítás költsége jóval magasabb, mint egy hulladéklerakó telepen tárolni, ezzel az újrahasznosításával foglalkozó üzemeket kedvezőtlen gazdasági helyzetbe hozva. Ellentétben a vékony rétegű napelem újrahasznosítása (CIGS, CdTe) garantálja a nagyobb profitot, mert ezek drágább alapanyagokból és alkatrészekből épülnek fel. Az anyag koncentrációjának arányát, az újrahasznosítás mértékét és a nyers anyagok piaci értékét szemlélteti euró/ kilogramm-ban az 1. ábra. (LME árak - 2014. április).

	Anyagok												
	Al	Cd	Cu	Ga	In	Mo	Plas.	Se	Si	Sn	Te	Ü.	Zn
x-Si (%)	17,5		1,0				12,8		2,9			66	
CdTe (%)		0,08	0,03				3,0			0,02	0,07	97	
CIGS (%)			0,01	0,01	0,01	0,12	3,0	0,01				97	0,04
	Újrahasznosítási arány												
	(%)												
	100	98	78	99	75	99	-	80	85	99	80	97	90
	Üzleti ár												
	(€/kg)												
	1,3	1,24	4,8	199	543	19	0,09	42	1,5	16	77	0,1	1,4

1. ábra: A napelem összetevőinek arányai anyag, újrahasznosítási arány és üzleti árra levetítve, ahol Al: alumínium, Cd: kadmium, Cu: réz, Ga: gallium, In: indium, Mo: molybdenum, Plas: műanyag, Se: szelénium, Si: szilícium, Te: Temmurium, Ü.: üveg, Zn: cink.

6. Ökológiai lábnyom

Az egyik legfontosabb kérdés, hogy hiába hívjuk megújuló energiának, mekkora is az ökológiai lábnyoma egy fosszilis energiaforráshoz képest. Egy nagy előnye, hogy ezek a rendszerek pozitív hatást gyakorolhatnak a biológiai elvárásoknak mind a növény, mind az állatvilág esetében. Ebből kifolyólag a napelemeket fokozottan védett zöld területeken is telepíthetők, ha a megjelenése semmiféle tekintetben nem változtatja meg az élővilágot.

Ha sorra vesszük a napelem legfőbb alkotóelemeit, meglátjuk mennyire is káros a környezetre, ez a fajta zöldenergia.

Üveg: Csökkentet vas tartalmú speciális üveg, amelynek az újra hasznosítása már megoldott.

Szilícium: Egy erősen tisztított és kristályosított homok.

Műanyag: Rögzíti a szilícium lapokat és a szigetelést, a háttérét adja magának a napelemnek. Gyártástól és gyártótól függ, milyen könnyen dolgozható fel azonban az biztos, hogy egy tűzálló és veszélytelen anyagról van szó.

Műanyagfólia: Napelemnek a szigetelésére szolgál, csupán pár grammról van szó panelenként. Ez az anyag szintén gyártótól függően újrahasznosítható.

Alumínium: A fémhulladékra szakosodott feldolgozó helyeken leadható és feldolgozható.

Réz és Ón: Újrafeldolgozható rézkábelek, forrasztási pontokon néhány gramm Ón fordul elő, ami minimális mennyiség és mellé veszélytelen is.

7. Összefoglalás

A napelem még egy közel sem tökéletes energiaforrás. Hátrányai közé sorolható a jelenlegi ára, de ez a jövőben a napelemes rendszerek árai csökkenni fognak, így még elterjedtebb lehet, mind Magyarországon, mind a világ bármely pontján. Az ára részben az előállítása miatt ennyire költséges, mert a Czochralski eljárás igen magas hő igényel az előállítás közben, így ez rengeteg energia igénybevétellel jár.

Mindemellett, nem mehetünk el szó nélkül a még több pozitív tulajdonsága mellett sem, mivel 1 m² mono- illetve polikristályos napelem 15 éves élettartamot feltételezve 450-500 kg CO₂-t takarít meg, míg az amorf szilícium napelem csupán 160 kg CO₂ megtakarítására képes a földgáz felhasználásához viszonyítva. A mono- és polikristályos napelemek négyzetmétere így 120-140 gha megtakarítást jelent 15 év alatt, míg az amorf napelem esetén 44 gha-t. Szinte minden éghajlaton

használható, mindenhol más típus a leghatékonyabb és így egy örök energiaforrásból tudunk házakat, épületeket villamos energiával. Előállítás után környezetét egyáltalán nem szennyezi, ellenben ez a fajta zöldenergia szimpla használata, rengeteg CO₂ kibocsátásának megakadályozásához segít minket.

8. Irodalomjegyzék

- <https://www.eon.hu/hu/blog/napenergia/napelem-tipusok-melyiket-valasszam.html?fbclid=IwAR09BUASiz9loQ6CAJziMI9q1U9QH3zZLO93toP1MvEWYabEVX1UYZuyVY>
- [1] <https://www.mnnsz.hu/napelemek-fajtai/?fbclid=IwAR2wJwP4IvZektfGBTLITob8dhir5HHJm0927LeVMdeAXfWUEPq8W7PoWs>
- [2] <https://www.solarpanel.wiki/category/solar-panels-information/>
- [3] <https://www.solarpanel.wiki/category/solar-panels-information/>
- [4] <https://alternativeenergysourcesv.com/best-monocrystalline-solar-panels/>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/czochralski-process>
- [6] <https://www.vgfszaklap.hu/hirek/4518-a-szilicium-utja-a-napelemig>
- <https://www.mvmpartner.hu/hu-HU/Szolgalatasok/Villamos-energia/Erdekessegek/Amegujuloenergiaforrasokosszehasonlitasakulonbozorgiaatalakitokeletciklusanakkoznyezetihatasaiszerint>
- [7] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>
- [8] <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>
- [9] Federica Cucchiella, Idiano D' Adamo, Paolo Rosa: *End-of-Life of used photovoltaic modules*, A financial analysis Renewable and Sustainable Energy Reviews 47 (2015)
- Yan Xu , Jinhui Li , Quanyin Tan , Anesia Lauren Peters , Congren Yang :
- [10] *Global status of recycling waste solar panels: A review*, Waste Management (2018)
- [11] Vasilis M. Fthenakis: *End-of-life management and recycling of PV modules*, Energy Policy 28 (2000)