

A szilícium alapú napelem cella összehasonlítása a festékérzékenyített napelem cellával

Varga Zoltán^{1,2}, Dr. Rácz Ervin³

¹ Óbudai Egyetem, Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika Doktori Iskola (PhD hallgató) 1034 Budapest, Bécsi út 96/B, varga.zoltan@uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, varga.zoltan@uni-obuda.hu

³ Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, 1034 Budapest, Bécsi út 96/A, racz.ervin@uni-obuda.hu

Egyes prognózisok szerint a festékérzékenyített napelem esélyes utódja lehet a kristályos szilícium alapú napelemeknek, ugyanis előállításuk olcsóbb és nem is annyira terheli a környezetet. Ennek hatására célul tűztük ki, hogy különböző paramétereket figyelembevételével – úgy, mint a rövidzárási áram, üresjárási feszültség, maximális teljesítmény, hatásfok, élettartam, működési hőmérséklet – összehasonlíjuk a szilícium alapú napelem cellát a festékelérzékenyített napelem cellával.

Kulcsszavak: Dye Sensitized Solar Cell, festékérzékenyített napelem, DSSC, szilícium alapú napelem, hatásfok

1. Bevezető

A globális klímaváltozás kapcsán sok szó esik a megújuló villamosenergia termelés kiaknázhatóságának lehetőségéről. A környezeti problémák további nyomást jelentenek (pl.: megnövekedett széndioxid kibocsátás) a mai társadalom energiafogyasztásának kielégítésében. Ezáltal korunk kutatói számos új, meghatározó kihívásokkal kell szembenézzenek. A napenergia közvetlen villamos energiává való átalakítása során a beeső fotonok szabad töltéshordozókat keltenek a napelem cella félvezetőanyagában, amelyet szétválasztunk [1].

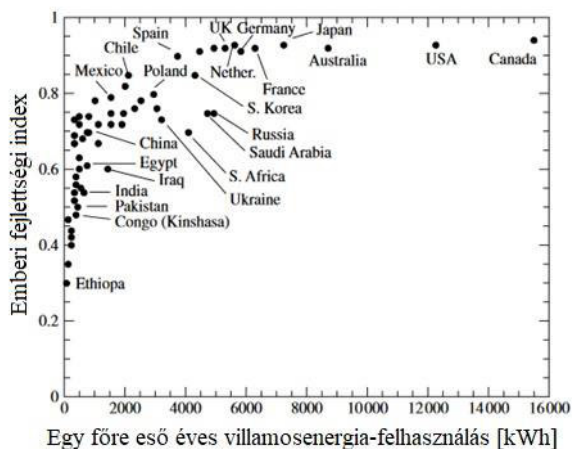
A piacot befolyásoló költségsökkentési kényszer és a különböző Európai Unió direktívák és célok kitűzése Magyarországon is elérhetővé teszi a napelem panelek szélesebb körben való sokszínű alkalmazását [2] [3]. A jelenlegi nemzetközi piacot a szilícium alapú napelem cellák dominálják, de a közeljövőben

a festékekkel érzékenyített napelem cellák ezen dominancia megtörését okozhatják. [4]

Célunkul tűztük ki, hogy különböző paramétereket figyelembevételével – úgy, mint az rövidzárási áram, üresjárási feszültség, maximális teljesítmény, hatásfok, élettartam - összehasonlítjuk a szilícium alapú napelem cellát a festékekkel érzékenyített napelem cellával.

2. A nagy kép

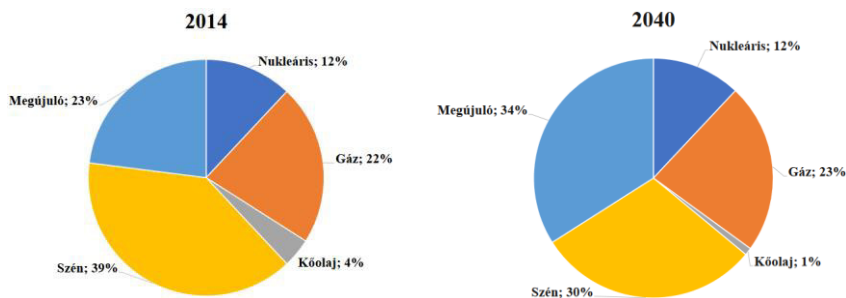
Az emberiség energiafogyasztásának igénye az utóbbi időben drámaian megnőtt. Az egy főre eső éves villamosenergia-fogyasztást a kutatók évente mérik és összehasonlítják, szembeállítják ezen értékeket országosan az emberi fejlettségi indexszel (angolul: Human Development Index, rövidítve: HDI). Ezáltal egy átfogó képet kaphatunk a villamosenergia fogyasztás és emberiség kapcsolatáról. Az 1. ábra egy 2000-es években készült HDI felmérést szemléltet, amelyet 60 országot, a Föld népességének 90%-át foglalja magába. Az emberi fejlettségi indexnek három összetevőből – úgy, mint a születéskor várható élettartam, oktatásban megszerzett tudás és egy főre jutó vásárlóerő paritáson számított bruttó hazai termék (GDP) - kalkulált érték, amely 0 és 1 közötti értéket vehet fel [5]



1. ábra: Emberi fejlettségi index (HDI) és. egy főre eső éves villamosenergia-felhasználás kapcsolata [5].

Tehát, az emberiségnek mindenképpen villamos energiára van szüksége. Manapság a megbízható és rugalmas energia rendszerek a fosszilis energiahordozókra alapoznak, amelyek domináns szerepet töltenek be világviszonylatban. A fosszilis energiahordozók tömeges felhasználásának

következménye az üvegházhatású gázok (pl.: CO₂) légkörben való túlzott megjelenése. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése érdekében számos megújuló energiaforrást térképeztek fel az utóbbi időben, amelyek meghatározó figyelmet kapnak világszerte, mint alternatív megoldások a globális problémára. Egyes prognózisok szerint a megújuló energiák várhatóan 2030 körül megelőzik a szenet, ezzel a legnagyobb energia forrássá válva, és 2040-re eléri a teljes energiatermelés 34%-át, amelyet a 2. ábra szemléltet [3].



2. ábra: Globális villamosenergia felhasználás viszonya 2014-ben és a prognosztizálások szerint 2040-re [3].

A megújuló energiafogyasztások közül a legnagyobb figyelmet világszemléletben a napenergia, azon belül is a napelem kapta 2016-ban [3]. Ezen szemlélet tovább is fennmaradt. A napenergiát közvetlenül villamosenergiává alakító eszköz a napelem (angolul: Photovoltaic, rövidítve PV). Néhány piaci elemző szerint 2050-re a napelem használata 25%-ot is elérheti a villamosenergia termelésben [3] [6]. Ezen meglátásmódot alátámasztja, hogy a napelemes rendszerek ára az elmúlt öt évben 50%-ot csökkent [3] [7].

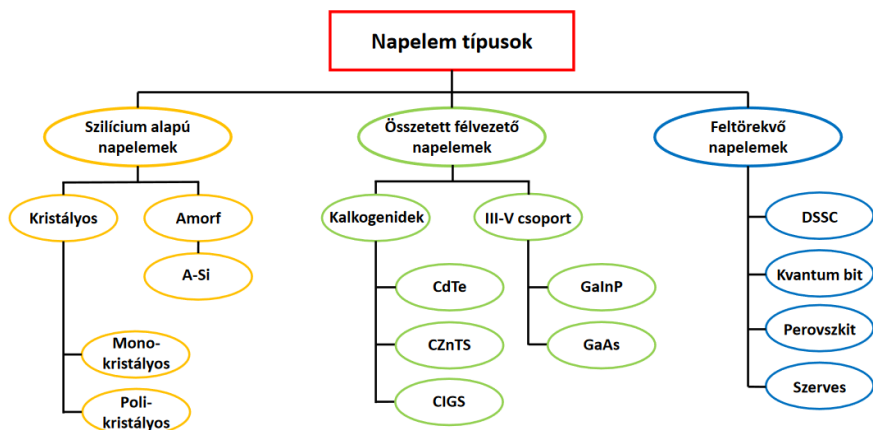
Habár, sok szó esik a napelemek ürügyén, hogy mennyire zöld technológia, de ezt az állítást egy életciklus elemzéssel (angolul: Life Cycle Analysis, rövidítve LCA) lehetne pontosan megállapítani. Az életciklus elemzést Dr. Tamaska László, Dr. Rédey Ákos és Vizi Szilárd az Életciklus elemzés készítése című könyvükben az alábbiaként definiálták: „Az életciklus-elemzés egy termék, folyamat vagy szolgáltatás életútja során vizsgálja a környezeti szempontokat és a potenciális hatásokat.” [8] Az életciklus elemzés három részből tevődik össze: termelés, üzemelés, lebontás. A napelemek vagy napelemes rendszerek esetén a termelés, szállítás és lebontás CO₂ kibocsátással jár. A napelemes rendszereket általában azért hívjuk zöld energiának, mert termelésük során egyáltalán vagy csak kevésbé terhelik a környezetet. Tehát, működésük közben nem vagy kevésbé bocsátanak ki szén-dioxidot. Az olvasóban felmerülhet, hogy egy napelem mikor bocsát ki CO₂-t. A napelemes rendszerek esetén - földrajzi elhelyezkedésétől függően - előfordul a napelem panelek felületének a tisztítása, amely traktorral helyezett felülettisztító géppel vagy egyéb módokon történik.

3. Szemléletmód a napelemek ürügyén

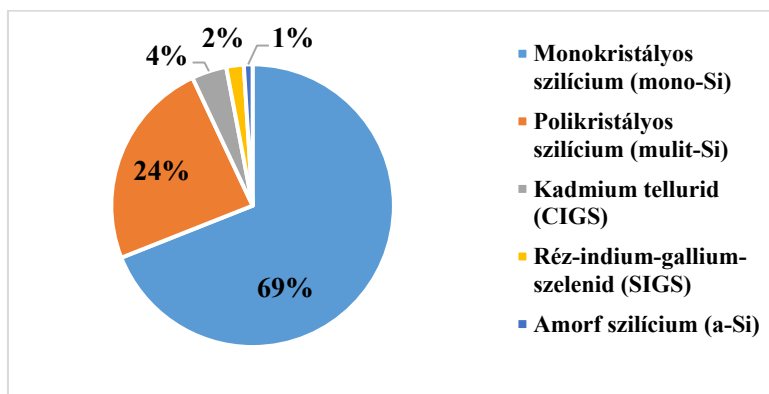
A korábbi fejezetekben bemutatásra került az emberiség villamosenergia szükségletének fontossága és arra való különböző törekvések, azon belül kiemelve a napelemet, annak fejlődési, gazdasági irányzatait a jelenre- és a jövőre való tekintettel. Ezúton érdemes áttekinteni a különböző napelemeket, illetve a fotogerjesztésre adott villamos paramétereit.

A napelemek egyik legszélesebb körben használt csoportosítási formája az anyag alapján történő csoportosítás. Az 4. ábra szemlélteti a napelemek csoportosítását (anyagjuk alapján). Ahogyan látható nagyon sok különböző napelem létezik, viszont Mariusz Malonwski és Haitham Abu-Rub a 2017-es cikkükben feltérképezték, hogy 2015-ben a világpiacon milyen napelem típusokat alkalmaznak a leggyakrabban, amely az 5. ábrán látható [3]. A cikkünkben minden napelem típus nem kerül bemutatásra. Kifejezetten a szilícium alapú napelemeket és a festékkézenyített napelemeket (angolul: Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC), amelyek a feltörekvő napelem típusokba tartoznak mutatjuk be (lásd: 4. ábra legszélső oszlopa).

Az egyes napelem típusoknak eltérő a hatásfoka [9]. A hatásfok alatt a napelem felületére eső fotonok villamosenergiává való átalakításának hatásfokát értjük. A napelem villamos paraméterei – úgy, mint rövidzárási áram, üresjárási feszültség, teljesítmény, kitöltési tényező és hatásfok – több paramétertől függ, mint a besugárzás teljesítménye, hőmérséklet, napelem felületének tisztasága.



3. ábra: Napelemek csoportosítása alapanyag szerint, ahol a kalkogenidek a réz származékokat jelenti [10] [11].



4. ábra: A globális napelem piac eloszlása 2015-ben [3].

A napelem hatásfokát (η) az alábbi képlet segítségével tudjuk kiszámolni:

$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{IN}}$$

, ahol P_{IN} a napelemet ért besugárzás teljesítménye, V_{OC} az üresjárási feszültség, I_{SC} a rövidzárási áram és FF a kitöltési tényező. A kitöltési tényezőt (angolul: Fill Factor) két terület hányadosaként tudjuk kiszámítani és az értéke 0 és 1 közötti szám. A kitöltési tényezőt az alábbi képlet segítségével tudjuk kiszámítani:

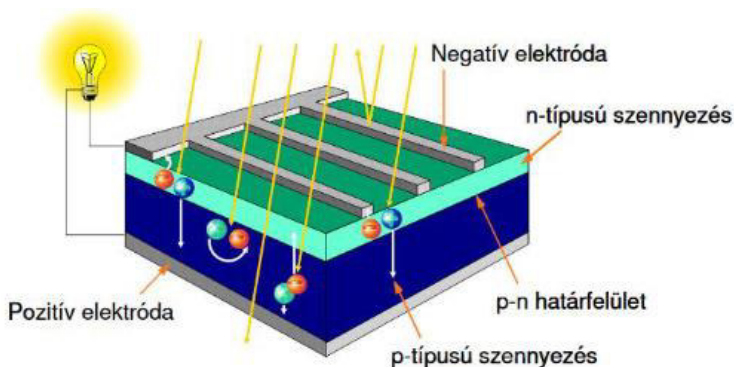
$$FF = \frac{MPP}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

, ahol MPP a maximális teljesítményű pont.

4. Szilícium alapú napelem

Fentebb láthattuk, hogy a szilícium alapú napelemek elég nagy részt foglalnak el a napelem világpiacán. A szilícium alapú napelemekre jellemző a p-n átmenet. A p típusú anyagra (pl.: bór diffundálással) fémréteget visznek fel, amely a pozitív elektród (anód) szerepét tölti be. Az n típusú anyagra (pl.: foszfor diffundálással) vagy vékony fémcsalákból készült hálózatot gözölnek, vagy egy nagy optikai áteresztőképességű vékony vezető oxid (angolul: Transparent Conductive Oxid) réteget alakítanak ki, amely a katód. A fémzetlen n-típusú felületet passzíválják szilícium-dioxiddal (SiO_2), amely a rekombinációs veszteség csökkentését segíti elő. A további veszteségek csökkentése érdekében egy antireflexiós felülettel, tükrözésgátló felülettel vonják be a passzívált felületet. Az antireflexiós réteget rápermetezéssel vagy anizotróp kémiai maratású strukturálással hozzák létre. Az elektromos tér hatására a félvezető belsejében a szabad töltések elektronokra és lyukakra válnak szét. Az elektronok az n réteg felé,

a lyukak a p réteg felé vándorolnak. A gerjesztett elektronok – amennyiben az elülső és hátoldali kontaktusok zárva vannak – körbeérnek a p rétegbe, ahol rekombinálnak a lyukakkal. A megnövekedett energiájú elektornok áram formájában levezetik többlet energiájukat. Az 5. ábrán látható a mono- és polikristályos napelem cella keresztmetszeti képe. Az amorf szilícium esetén a felépítés kicsit eltérő. Az amorf szilíciumnál az úttörést egy semleges réteg jelenti, amely a p és n réteg között található [12].



5. ábra: Mono- és polikristályos napelem cella keresztmetszete [12].

A monokristályos napelem esetén a gyártástechnológiát figyelembe véve Chochralski-eljárással növesztenek egy nagyjából 1 méter hosszú és 30 cm átmérőjű szilícium egykristályt, amelyet felszeletelnek. A szeletelést követően pedig wafer-eket hoznak létre belőlük. A polikristályos napelemek esetén a lehűtött szilícium durva szemcsésű kristályszerkezetbe rendeződik, amelynek méretei a miliméterestől a centiméteresig is terjedhet [12].

5. Mi az a DSSC?

Mielőtt a festékkézenyített napelem cella működési hátterébe belemennénk érdemes áttekinteni a történelmi előzményeket.

Történelmi háttér

A fényérzékeny festékanyagot már a fényképészetben elkezdtek használni. A fényképészetben ezüst-halogenideket használtak, amelyek tilossávja 2,7 – 3,2 eV nagyságrendű. Ebből kifolyólag érzéketlenek a látható spektrum nagy részére [13]. Az első pánkromatikus filmet egy német fényképész és fotokémikus, Hermann Wilhelm Vogel fejlesztette ki 1873-ban [13] [14]. Abban az időben alkalmazott fényképészeti emulziók a látható spektrum közül inkább az ultraibolya, ibolya és

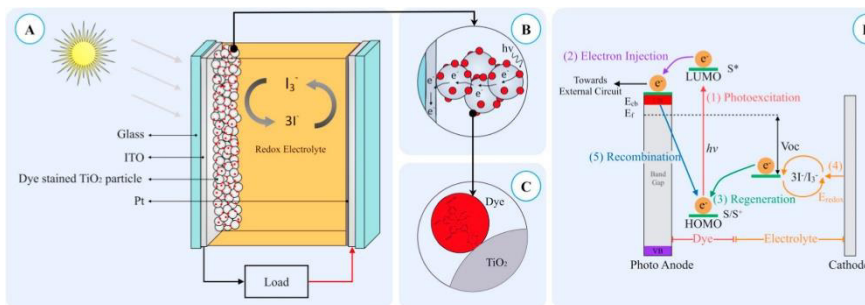
kék tartományra, illetve mérsékelten a zöld színre voltak érzékenyek. Vogel a látható spektrum maradék részére is érzékennyé tudta tenni a filmet fényérzékeny festékek hozzáadásával.

Később, hasonló kémiát használva, az első fénylektróda érzékenyítése megtörtént. A fénylektróda fény hatására elektronokat bocsát ki. Az áttörés az 1960-as években történt, amikor igazolták, hogy a fény által gerjesztett festék elektronokat juttat az n-típusú félvezető vezetési sávjába. A kutatók azzal az ötlettel álltak elő, hogy a fényérzékeny festék félvezető réteg felszínéhez kémiai úton történő kötődése hatékony üzemelést biztosít. Majd ezt követően felismerték, hogy mikroszemcsés anyagot érdemes használni a nagyobb felület érdekében. Így kezdte kibontakozni magát a festékérzékenyített napelem cella, de 1991-ig csak tudományos érdekesség maradt a kutatók számára a félvezető-elektrolit határfelületen fellépő fotokorrózió miatt. A 1,5 eV körüli tilossávú félvezetőknek nagy a hatékonysága, de közben erősen korrodálódnak. Ezzel szemben a 3-4 eV körüli félvezetőknek kisebb a hatásfoka, de többnyire ellenállóak a korrózióknak. Természetesen a kiválasztott elektrolit befolyásolja a korrózióknak a mértékét, jelentős mértékben csökkentheti. Megfelelő elektrolit kiválasztással a redoxpár könnyen oxidálható. Jelenleg, az n-típusú félvezetők felületén lezajló korrózió megoldott, de a p-típusú félvezetőkénél még megoldatlan [13].

A korrózióval szemben történő ellenállás véget félvezető anyagnak a titán-dioxidot (TiO_2) választották ki. A fotográfia és a foto-elektrokémia érdekes konvergenciája, hogy a fényképszórtban használt ezüst-halogenidek tilossávja 2,7 – 3,2 eV nagyságrendűek érzéketlen a látható spektrum nagy részére csak úgy, mint a TiO_2 [13]. A fentebb említett évszám, 1991, azért kiemelkedően fontos, mert abban az időben jelent meg a Nature folyóiratban Michael Grätzel cikke a festékérzékenyített napelem celláról, amely áttörő sikert eredményezett [4].

Festékérzékenyített napelem cella működése

Technológiai oldalról nézve lényeges különbség van a hagyományos p-n átmenetes félvezető napelem cella és a festékérzékenyített napelem cella között. A különbség abban rejlik, hogy a szilícium alapú napelemeknél a félvezetők nyelik el a fotonokat és választják szét a töltéshordozókat, addig a DSSC-nél ez a kettő külön funkcióként jelenik meg. A belépő fotonokat egy kémiai úton félvezető rétegre felvitt festékérzékenyített réteg nyel el. A töltésszétválasztódás a két anyag határán történik, a gerjesztett elektronok bekerülnek a félvezető réteg vezetési sávjába, ahonnan az elektronok az üveghordozón, mint elektródon keresztül kivezethetők [4] [13] [15] [16].



6. ábra: A hagyományos festékkézenyített napelem cella (DSSC) felépítése [4]

A beeső fotonok hatására a fényérzékeny festékréteg belső energiája megnő. A gerjesztés hatására megnőtt belső energiát a festékréteg elektronok injektálásával leadja. Az elektronok ezután egy n-típusú félvezető oxid rétegbe jutnak (TiO_2), ahonnan az elektronok elvezetődnek egy hátoldali elektródához (anód). A festékanyag elvesztett, leadott elektronjait pótolni tudja egy jodid/trijodid (I^-/I_3^-) elektronit oldatból, ami a fény ellenelektódtól (katód) vesz fel elektronokat. A katódhoz az elektronok egy fogyasztón (terhelésen) keresztül jutnak el, ezzel zárul az áramkör [4] [13] [15] [16].

6. Összehasonlítás

Az 1. táblázatban a szilícium alapú (mono- és polikristályos, amorf-Si) napelemek technológiai paraméterei láthatóak. A táblázatban szereplő számok közelítések és laboratóriumi környezetben mért értékeket prezentálnak. Viszont jól látható, hogy a monokristályos napelem esetén nyerhető ki a legnagyobb hatásfok. A költségcsökkentés mellett ez az egyik fő oka, hogy a monokristályos napelem uralja a globális napelem piacot [12]. A gyártók az egyes napelemekre a 20-25 éves élettartamot garantálják [12]. Továbbá, az üresjárási feszültség az amorf szilícium napelemnél mutatkozik nagy értéknek, de a rövidzárási áram esetén a monokristályos napelem mutat kedvezőbb, nagyobb értéket. Hasonlóképpen, ez igaz a kitöltési tényező esetén is. Miután áttekintettük a paramétereket érdemes készíteni egy táblázatot, amelyben az előnyök és a hátrányok szerepelnek.

A 2. táblázat szemlélteti a szilícium alapú napelem előnyeit és hátrányait. Az előnyök között láthatóan megjelenik a kedvező, magas kinyerhető hatásfok (kifejezetten monokristályos napelem esetén), de emellett érdemes kiemelni, hogy a szilícium, mint alapanyag jelentős mértékben előfordul a Földön. Hátrányok esetén egyből szembetűnik a hulladékképződés. Mono- és polikristályos napelemeknél a vágás és szeletelés során a szilíciumkristályoknak körülbelül 50%-

a hulladékká válik. Valamint egy másik hátrány, hogy az elhasználódásokat követően veszélyes hulladéknak minősülnek.

1. táblázat: Szilícium alapú napelem technológiai paraméterei [12]

	Monokristályos	Polikristályos	Amorf-Si
Hatásfok [%]	24,7	19,8	12,7
Élettartam	20-25 év		
Üresjárási feszültség [V]	0,7	0,65	0,88
Rövidzárási áram [mA/cm ²]	42,2	38,1	19,4
Kitöltési tényező [%]	82,8	79,5	74,1

2. táblázat: Szilícium alapú napelem előnyei és hátrányai

Előnyök	Hátrányok
- Jó hatásfokkal üzemelnek - Az élettartamuk eléri a 25 évet is. - Eljárási technológia jelentősen kiforrott. - A szilícium, mint alapanyag bőségesen előfordul. - A polikristályos napelem alacsony termelési költségű az egykristályoshoz képest. - Amorf szilícium napelemeknél kevés anyag kell, mivel 1 µm vastag réteg elegendő.	- Monokristályos és polikristályos napelemeknél a vágás és szeletelés során a szilíciumkristályoknak kb. 50%-a hulladékká válik. - Előállításuk során terhelik a környezetet. - Elhasználódását követően veszélyes hulladékként kell kezelni. - Amorf szilíciummal alacsonyabb hatásfok érhető el, mint monokristályos napelemmel.

A festékérzékenyített napelem előnyei és hátrányai összefoglaló táblázatot a 3. táblázat szemlélteti. Az előnyök között kiemelhető az építészetben való alkalmazhatóságuk, mert egyes épületszerkezeti elemeket is kiválthatnak. További előnyt jelent, hogy szórt fényben (diffúz fényben) is jelentős hatékonyságot mutatnak. Hatásfokuk akkor is elérheti a 11%-ot [4]. Egyik hátrányok, hogy a szilícium alapú napelemek költségeinek éles csökkentése más napelem technológiák háttérbe szorítását eredményezte. A festékérzékenyített napelemek fő

problémája az elektrolit, amely változó hőmérsékleten nem túl stabil. Alacsony hőmérsékleten befagyhat, ezzel csökkentve a villamosenergia termelést és fizikai károkat okozhat.

3. táblázat: Festékérzékenyített napelem előnyei és hátrányai

Előnyök	Hátrányok
• Kiemelt szerepük van az építészeben: egyes épület-szerkezeti elemeket is kiválthatnak (pl.: árnyékoló elemként) • Átlátszó napelem egységek biztosítják a beltéri fényt és a bejutó fénynek köszönhetően a belső tér természetes melegítését is. • Szórt fényben is jelentős hatékonyságot mutatnak. Hatásfokuk akkor is megközelítette a 11%-ot. • A cella kitöltési tényezője 0,7 feletti nagyon alacsony fény intenzitásban is. • Konvencionális napelem celláknál kisebb a kitöltési tényezője (<0,5) ugyanilyen feltételek mellett. • Természetes festékanyagok felhasználásával is lehet DSSC-t készíteni.	• A szilícium alapú napelemek költségeinek éles csökkentése más típusú napelem technológiák háttérbe szorulását eredményezte. • A festékérzékenyített napelemek még kereskedelemben nem kaphatóak, tehát nagy-szabású telepítéseknél nem alkalmazzák. • Egyik fő problémája az elektrolit használata, amely változó hőmérsékleten nem túl stabil. • Az elektrolit alacsony hőmérsékleten lefagyhat, csökkentve a villamosenergiatermelést és fizikai károkat okozhat.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Bodnár István. Napelem hőmérsékletfüggésének kísérleten és szimuláción alapuló vizsgálata, Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok, XII. évfolyam, 4.szám, pp. 195-206 (2017)
- [2] World Energy Outlook 2015, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2015.
- [3] M. Malinowski, J. I. Leon and H. Abu-Rub, "Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2132-2146, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2690343.
- [4] Brian O'Regan, Michael Grätzel: A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, Nature Publishing Group, Nature 353, pp. 737-740 (24. October 1991)
- [5] Antonio Luque, Steven Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition, 2011, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-0-470-72169-8
- [6] Technology RoadMap Solar Photovoltaic Energy, Int. Energy Agency (IEA), Paris, France, 2014
- [7] Statistical Figures of the German Solar Power Sector (Photovoltaics), BSW-Solar 2011.
- [8] Dr. Tamaska László, Dr. Rédey Ákos, Vizi Szilárd: Életciklus elemzés készítése (2001) Veszprémi Egyetem Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék Tisztább Termelés Magyarországi Központ ISBN 96 00 6829
- [9] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, and E. D. Dunlop, Solar Cell Efficiency Tables (Version 48). Hoboken, NJ, USA: Wiley, Nov. 2016.
- [10] Ibn-Mohammed, T., Koh, S.C.L., Reaney, I.M. et al. (2017). Renew. Sustain. Energy Rev.80:1321–1344.
- [11] Alagarsamy Pandikumar, Kandasamy Jothivenkatachalam, Karuppanapillai B. Bhojanaa: Interfacial Engineering in Functional Materials for Dye-Sensitized Solar Cells, 2020 SBN: 9781119557333
- [12] Armin Rauber: SOLTRAIN-G04 előadás Napelemtechnológiák és jellemzőik, (A fordítás a Soltrain projekt (4.1030/Z/02-067/2002 sz. EU Altener program) keretében, a SzIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék gondozásában készült.)
- [13] Grätzel, M.: Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 4(2), 145-153. (2003)

- [14] W. West, Proc. Vogel Centennial Symp., Photogr. Sci. Eng. 18 (1874)35.
- [15] Gyarmati Ádám: Titán-dioxid alapú, festékanyaggal érzékenyített napelemek fejlesztése, TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest (2015)
- [16] Varga Zoltán: Festékérzékenyített napelem cella hőmérséklet-függésének vizsgálata, TDK dolgozat, Óbudai Egyetem, 2019