

# Textil alapú napelemek

Lázár Károly

**Kulcsszavak/Keywords:** Napelem, Fotovoltaikus elem, Fotovoltaikus szálak, Fotovoltaikus kelmék, Intelligens textíliák és ruházat  
Solar cells, Photovoltaic cells, Photovoltaic fibres, Photovoltaic fabrics, Smart textiles and clothings

A napelem egyike az alternatív fenntartható energiaforrásoknak (naperőművek, szél-turbinák, vízerőművek, hullám- és árapály-erőművek, geotermia alapú áramtermelés), amelyek iránt egyre nagyobb az igény. A 2016 végéig kiépült naperőművek 306 GW kapacitása a világ villamosenergia-termelésének 2%-át adta, de az előrejelzések szerint 2021-re ez 700–900 GW-ra nőhet, ami a napenergia-termelés részarányát a világ villamosenergia-termeléséből megháromszorozhatja [1]. Egy Németországban készült felmérés adatai szerint a szélenergia vezet ugyan a „zöld” villamosenergia-termelés összetételét, a napelemek igen nagy jelentőségre tettek szert. 2019 júniusában például a teljes nettó kibocsátás 19,2%-át adták – ami 7,17 terawattórának felel meg –, míg a lignit 18,7%-ot, a szélenergia 18%-ot képviselt. Bár az ilyen csúcserőterek nem ritkák a nyári hónapokban, a napenergiának akkor sikerült először megelőznie a lignites áramtermelés arányát [10].

A napenergia kihasználhatósága változó, ugyan, mégis jelentős sikerek mutatkoznak annak közvetlenül elektromos energiává való átalakítása terén a napelemek felhasználásával.

A napelemtáblák üveg- vagy polikarbonát-lemezekre helyezett, összekapcsolt napelemeket tartalmaznak. Hátrányuk, hogy csak síkfelületen helyezhetők el. Súlyosak, ezért a tartószerkezetüknek elég erősnek kell lennie ahhoz, hogy elbírja a terhelést. Az üvegtáblák törékenyek is, ezért óvatosan kell azokat tárolni és szállítani. Mindezen hátrányok kiküszöbölésére egyre nagyobb figyelmet fordítanak a könnyebb, hajlékonyabb, műanyagfóliákra felépített napelemcellákra, amelyek ellenállnak az időjárás viszontagságainak, tartósak, kisebb anyagfelhasználást igényelnek és szerkezetük olcsóbban állítható elő. Széles körben jelent meg a kereskedelemben az olyan napelemek, amelyeket vékony műanyag- vagy fémlemezre lehet felszerelni. Ezek sokkal könnyebb szerkezetek és előállításuk olcsóbban megoldható. Azonban ezek a vékony lemezek a szerelés és az

alkalmazás során eltörhetnek, ezért nagy gonddal kell eljárni, ha ezek szolgáltatják a napelemtábla alapját. A hajlékony, ugyanakkor erős textilanyagok megoldást kínálnak erre a problémára [2, 14].

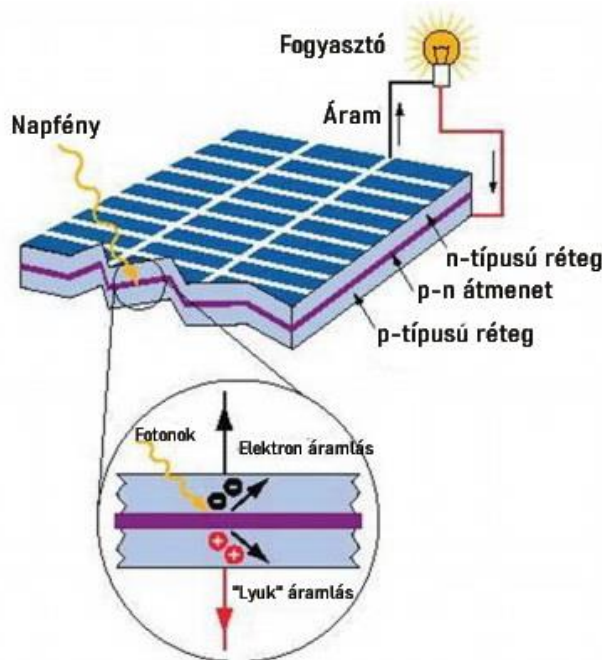
A textil alapú napelemek iránti érdeklődést elsősorban az intelligens ruházati cikkek egyre szélesebb körű elterjedése keltette fel, hiszen ezekbe különböző érzékelőket, készülékeket építenek be, amelyek áramellátásáról gondoskodni kell. Ez idő szerint erre elemeket, akkumulátorokat használnak, de sokkal előnyösebb volna, ha napelemekkel lehetne őket táplálni (1. ábra).



1. ábra. Napelemekkel felszerelt „okos” dzseki [14]

## A napelemek elvi működése

A napelemek – más néven: fotovoltaikus (PV) elemek – fény besugárzásának hatására fejlesztenek elektromos áramot. Ez nem csak napsugárzás, hanem más fény



2. ábra. A napelem-cella működési elve [6]

hatására is bekövetkezik. A fotovoltaikus elemekben két vékony, 1–4  $\mu\text{m}$  vastagságú félvezető (pl. szilícium-) réteget helyeznek el egymásra, amelyek közül az egyik, a vékonyabb, pozitív ( $p$  típus) (a napelem-cellában ez van alul), a másik negatív ( $n$  típus) elektromos töltésű. A két réteg érintkezési felülete az ún.  $p$ - $n$  átmenet.

Az  $n$  típusú réteg anyagát elektrontöbblettel rendelkező anyaggal (pl. foszforral) szennyezik, ezért ebben negatív töltéstöbblet keletkezik (innen származik az  $n$  típus elnevezés). A foszfor ugyanis 5 vegyértékelektronnal rendelkezik, amelyek közül 4 részt a kötésben, az ötödik szabad elektronként a vezetési sávba juthat. Ezt a réteget éri majd a napfény.

A Napból érkező elektromágneses hullámegységek, a fotonok a  $p$ - $n$  réteg határán gerjesztik az elektronokat, amely következtében delokalizált elektron és mozgékony lyuk párok keletkeznek. A  $p$ - $n$  rétegben kialakult belső elektromos mező térerősség-vektora az  $n$  rétegtől a  $p$  réteg irányába mutat. A napelemben a belső elektromos tér a lyukakat „lefelé” mozgatja a  $p$  rétegen keresztül, amíg az elektronokat „felfelé” mozgatja az  $n$  rétegen keresztül, a külső áramkör irányába. Ennek köszönhetően jön létre a feszültség a fogyasztó (lámpa) kivezetésein. Az elektron-lyuk párok rekombinációja során felszabadult energia hővé alakul (2. ábra) [3, 4, 5, 6].

A napelemcellák készítésére a félvezető tulajdonságú szilícium kiválóan bevált. Ezen kívül azonban más, hasonló tulajdonságú anyagokat, vékonyfilm-félvezetőket is kifejlesztettek erre a célra, néhány elem szeretlen vegyületétől a szerves molekulákig és polimerekig [2]. Ezek legtöbbször szeretlen anyagok: pl. GaAs (gallium-arzenid), CdTe (kadmium-tellurid), CIGS (réz-indium-gallium-szelen). A szerves polimer alapú fotovoltaikus

anyagok lehetnek nagy szerves molekulák, mint amilyenek a fullerének (az elemi szén mesterséges módosulatai), vagy lehetnek polimerek, vagy ezek kombinációk, bár a fejlesztésekben a polimer típusok dominálnak.

A napfényt abszorbeáló festékekkel érzékenyített (dye sensitized, DSSC) napelemcellák jobban illeszkednek a fényforrás spektrumához, mint egy egyedüli félvezető alapú cella. Az ilyen napelemcella két vezető elektródából áll, amelyek közül az egyik félvezetővel (pl.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  vagy  $\text{SnO}_2$ ), majd ezt követően fotoaktív festékkel van bevonva. Az ilyen tulajdonságú szintetikus festékek anyagok többnyire drágák és/vagy mérgezők, ezért jobbak a természetes anyagú festékanyagok (pl. kármín), amelyek azonban kevésbé hatékonyak. Az elektróda katalizátorral (platinával vagy grafittal) van bevonva. A két elektróda közötti rést elektrolittal töltik meg (jellemzően jód/trijód vagy más redox párok alapján, néha fém sókat is tartalmazva) [12].

Jelentős fejlesztésnek számít a perovszkit anyagok alkalmazása. Ezek olyan kristályszerkezetek, amelyek nagyjából megegyeznek a kalcium-titanát ( $\text{CaTiO}_3$ ) szerkezetével. Ezek a színezékekkel érzékenyített eszközben elhelyezett szerves-szervetlen halogenidok (a fluor, klór, bróm és jód vegyületei) vezetnek a jodidot egy folyékony jodid alapú elektrolitban és mintegy 3% hatékonyságot mutatnak, de a teljesen szilárd állapotú változatban 20%-ot is elérnek (kb. 15 %-ot hajlékony változatban). Mivel felvitelükhöz folyadék alapú kenési technikát használnak, alkalmasak olcsó, nagy felületű termékek előállítására, de ömlesztett vegyületekre és javított stabilitásra van szükség ahhoz, hogy kereskedelmi forgalomba kerülhessenek.

A napelemek  $\text{kWm}^{-2}$ -ben mért teljesítményét szabványos körülmények között vizsgálják: AM=1,5 napfény-spektrumnál és 25 °C esetén.

## Elektromos vezetőképességű kelmék

A PV cella tetejét és alját – az anódot és a katódot – vezetőképesen össze kell kötni. Textil alapú PV cellák esetében ehhez arra van szükség, hogy maga a textilanyag vezetőképes legyen. Ezt a textiliát alkotó fonalak vezetőképességével vagy a kelme utólagos vezetőképessé tételével (vezetőképes réteggel való bevonással) lehet elérni [2].

A **vezetőképes fonalak** készülhetnek fém- vagy fém tartalmú szálakból. A fémszálaknak vékonyaknak kell lenniük (átmérőjük 2–40  $\mu\text{m}$ ), hogy a kelme ne váljék túl merevvé. Így is hajlamosak szakadásra a szokásos kelmegártási eljárások ill. az alkalmazások erős igénybevételével. Kifejlesztettek szálgyártásra alkalmas vezetőképes polimereket (pl. polianilin, polipirrol, politiofen), bár ezek vezetőképessége elmarad a fémszálakétól és nem elég hajlékonyak, nem igazán alkalmasak textilipari feldolgozásra. Egy lehetőség vezetőképes szálak előállítására az, hogy a szálát fémmel vagy vezetőképes polimerrel vonják be. Így jó vezetőképességet lehet elérni, anélkül, hogy a szál feldolgozhatósági tulajdonságai romlának. Lényeges azonban, hogy a fém vagy a polimer jól megtapadjon a szálra. A fém bevonat például jóval merevebb, mint maga a szál, ezért hajlamos arra, hogy a hajlítgatások hatására eltörjön. Ilyenkor a fémréteg folytonossága megszakad és a vezetőképesség elvész. A bevonatnak ellen kell tudnia állnia a további gyártási folyamat igénybevételének is, például magas hőmérsékletet is bírnia kell. Korom- vagy szén nano-szénecsövek beépítése a szál anyagába a szálhúzást megelőzően javíthatja

a szál vezetőképességét, de a szén mennyiségének legalább 10%-ot el kell érnie, de a 10% széntartalom a szálát keményebbé teszi, ami a továbbiakban megnehezíti a feldolgozást. A grafén szintén nagyon vezetőképes anyag, ami kisebb mennyiségben is elegendő lehet. Fémrészecskék hasonló módon való beépítése szintén használatos a vezetőképesség javítására, de ezek idővel kikoptathatják a szálképző lap furatait.

A vezetőképes szálak/fonalak kelmévé való feldolgozásánál figyelembe kell venni, hogy a fonalak a kelmében összekapcsolódnak és az összekapcsolódás helyein meghajlanak és nyomást gyakorolnak egymásra. Ezért azok a kelmekonstrukciók alkalmasak erre a célra, amelyeknél ez a hajlított elhelyezkedés és a nyomás a legkisebb. Szövetek esetében ez a feltétel legjobban sávolykötésnél teljesül. Kötött kelmékben a lánc- vagy vetülékbefektetés alkalmazása lehet a megoldás, amikor a vezetőképes fonalból nem készülnek szemek. Nemszött kelmék esetében a vezetőképes fonalak egyenesen befektethetők a rétegek közé. A hímzés is ígéretes eljárás lehet vezetőképes kelmék előállítására, amellyel a vezetőképes fonalakat egy programnak megfelelően lehet elhelyezni. Azonban a hímzés terjedelmesebbé teszi a képződött textiliát, ami nem előnyös a PV-rétegek készítésénél.

Kelmék vezetőképessé tételének másik módszere **vezetőképes kelmefelület** megoldása. Ez történhet festékfelület rávitelével, olyan festékkel, amely ezüst- vagy réznanorészecskéket tartalmaz. Ink-jet eljárásnál a festéket cseppeként juttatják a kelme felületére, amelyek a szárítás után apró különálló zónákat alkothatnak. Hőkezelés után a fémrészecskék között folytonos vezetőképes kapcsolódás jön létre. Hátrány, hogy a hőkezelés magas hőmérséklete (ami 180 °C-ig is terjedhet) olyan anyagú alapkelmére van szükség, ami ezt kibírja (pl. poliamid- vagy poliészter). Fontos, hogy a fémrészecskék jól tapadjanak a kelmére, hogy hajtogatáskor ne repedezzen meg a fémréteg, ami a vezetőképesség elvesztését jelentené. Filmnyomás alkalmazása esetén általában ezüst tartalmú pépet használnak, amelynek vastagsága elegendő kell legyen elég nagy vezetőképesség előállítására, ezért gyakran több rétegben kell felhordani.

Egy másik megoldás a vékony fém- (pl. arany- vagy alumínium-) réteg közvetlen felvitele a kelmére vákuumpárolgatással vagy ionsugaras ill. katódporlasztással. Ennél az eljárásnál is fennáll a felhordott fémréteg repedezésének veszélye. Ennek elkerülésére először egy vékony, vezetőképes polimer réteget kell felvinni, mielőtt a tetejére fémréteget hordanának fel. Minthogy a polimer sokkal hajlékonyabb és jobban tapad a textília felületére, még akkor is megmarad a vezetőképesség, ha a fémréteg megreped.

## Textil alapú napelemek

A textil alapú napelemek készítésére szánt textiliáknak háromféle típusa lehetséges:

- egyedi cellák vagy fotovoltaiikus film felerősítése a kelmére,
- fotovoltaiikus cellák közvetlen beépítése a kelmébe,
- már eleve fotovoltaiikus tulajdonságú szálakból készült kelme.

Az első típus nem hoz létre valódi fotovoltaiikus kelmét. A másik két eljárás mindegyikénél szükség van elektromos kontaktusok és félvezető rétegek elhelyezésére egy olyan anyagra – textilanyagból készült kelmére –, amelynek eltérő tulajdonságai vannak a szokványos elektronikai technológiákhoz képest [2].

## Fotovoltaikus (PV) cellák ráillesztése kelmére

Egy PV cella vagy PV film egyesítésével létrehozott fotovoltaikus textilra nem igazi napelem, csupán egy kelmé és egy PV panel kombinációja. Ezek egyike a kelmé egyszerű egyesítése egy nem törékeny PV panellel. Ennél a megoldásnál nincs szükség a PV cellák vagy a kelmék speciális kivitelére, így mindkettő széles választékban alkalmazható. Azonban a kelmé fizikai, mechanikai és esztétikai tulajdonságai tekintetében valószínűleg kompromisszumra van szükség. Ehhez járul, hogy a cellák és a közöttük létrehozandó elektromos kapcsolat felerősítése speciális megoldásokat igényel. Számos jelenlegi, napelem-cellákat tartalmazó „okos” (funkcionális) textiltermék ezzel a módszerrel készül. A PV filmek készítésére szolgáló technológiák már rendelkezésre állnak. Ugyancsak megoldott a vékony film hozzáerősítése a kelméhez, pl. varrással, hegesztéssel vagy laminálással. Nagyon fontos, hogy a PV film ne törjön el a felerősítési művelet során.

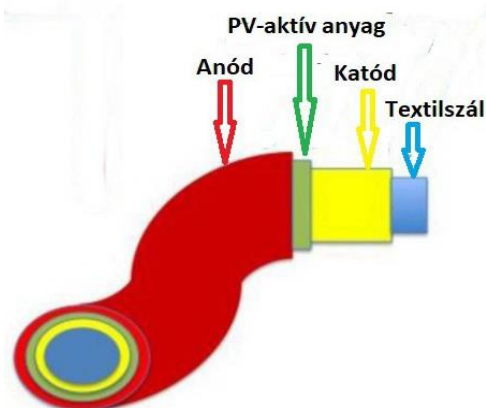
PV cellák textiliára való közvetlen elhelyezésére olyan anyagra van szükség, amely ellenáll a különböző rétegezési műveletek igénybevételeinek. A vékony félvezető film rögzítése nagy hőmérsékletet igényel, de a legtöbb szerves anyagú cella és a nem szerves anyagú cellák egy része szobahőmérsékleten vagy legalább 200 °C alatt megoldható. Ha ez a feltétel nem elégíthető ki, nagy hőállóságú szálakból kell készíteni a textiliát, például fém-, szén-, üveg- vagy polimidszálakból. 200 °C-ig poliészter vagy esetleg poliamid is használható.

## Fotovoltaikus szálak

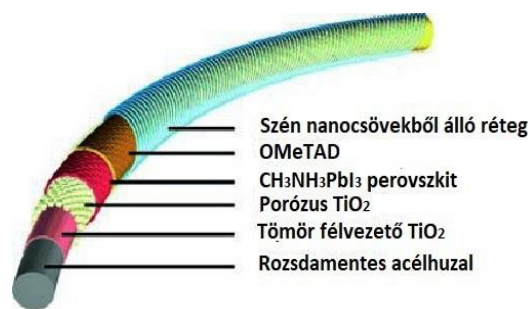
A 3. ábra a fotovoltaikus szál kialakításának elvi megoldását mutatja. A különböző rétegeket bonyolult technológiai eljárásokkal, viszik fel.

A fotovoltaikus bevonatú szálak használatának talán a legnagyobb akadálya, hogy amikor belőlük bármilyen eljárással kelmét készítenek, a feldolgozás során a szálak bevonata nagy koptató igénybevételnek van kitéve.

Egy példát a fotovoltaikus szál megoldására a sanghaji Fudan Egyetem egy fejlesztése mutat [7]. Perovszkit napelemeket fejlesztettek ki hajlékony szálak formájában, amelyeket szövéshez lehet felhasználni (4. ábra). Az anód finom rozsdamentes acélhuzal, amely tömör félvezető titán-dioxidréteggel van bevonva. Ennek tetejére egy porózus nanokristályos titán-dioxid réteg kerül. Ez nagy felületet biztosít a perovszkit réteg felhordásához. A következő réteg speciális szerves anyagból készült (OMeTAD). A külső burkolatot, amely katódként szolgál, egy átlátszó, szén nanocsövekből álló réteg alkotja. A perovszkit réteg elnyeli a fényt, amely az elektronokat gerjeszti és szabaddá teszi, ami töltéskülönbséget okoz



3. ábra. Fotovoltaikus bevonatú szál elvi megoldása [2]



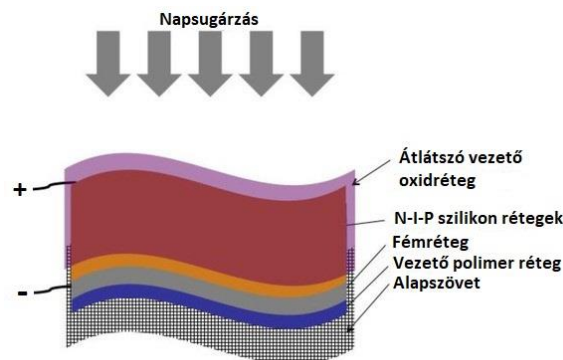
4. ábra. Fotovoltaikus bevonatú szál [7]

az elektronok és a formálisan pozitív töltésű „lyukak” között. Az elektronok belépnek a kompakt titán-dioxid réteg vezető sávjába, és az anódhoz mozognak. A „lyukakat” a szerves réteg rögzíti. A szén nanocső-katód nagy felülete és nagy elektromos vezetőképessége elősegíti a töltések gyors vezetését és nagy fotoelektromos áram keletkezését. Az így készült napelem 3,3% energiaátalakítási hatékonyságot érhet el, ami jelentősnek mondható.

## Fotovoltaikus szövetek

A fotovoltaikus szövetek készítésénél az egyes rétegeket speciális eljárásokkal viszik fel az alapszövetre. Ezek a rétegek rendkívül vékonyak, vastagságuk néhány mikrométer, ami lényegesen kisebb, mint a szövetnek a fonalkereszteződés okozta felületi egyenetlenségei. A tapasztalat szerint a sávoly- vagy atlaszkötésű kelmék felülete a legsimább, ezért ezeket helyezik előtérbe a fotovoltaikus szövetek készítésénél. A felület simaságát ezen kívül azzal is fokozzák, hogy a szövetet simító kezelésnek (kalanderezés) vetik alá. Erre egy elektromosan vezető polimer réteget visznek fel, és erre kerülnek a fotovoltaikus tulajdonságokat adó rétegek: a fotoaktív amorf (*n* ill. *p* típusú) szilíciumrétegek, majd a felső érintkező egy hagyományos átlátszó vezető oxidréteg, amely egyúttal védőbevonatként is működik (5. ábra) [2].

A rugalmas PV-cellák fejlesztése során számos rétegezési technikát kipróbáltak, beleértve a kémiai és fizikai folyamatokat is: a galvanizálást, a folyékony nyomtatást, a merítéses bevonást, a vákuumpárologtatást, az atomréteg-lerakást, a katódporlasztást, a kémiai párologtatást és a polimerizációt. Ezek gyakorlati kivitelezéséhez az elektronikai ipar és a textilipar szoros együttműködésére van szükség. A textiliparban jól ismert eljárás a kelmék folyékony anyaggal való bevonása merítéses vagy kenési eljárással, és nem ismeretlenek a gáz alapú folyamatok, mint például a plazmakezelés alkalmazása sem, így megvan a remény arra, hogy a sikeres üzemi gyártás is megvalósítható.



5. ábra. Fotovoltaikus rétegek szövet alapon [2]

## A textil alapú napelemek alkalmazási lehetőségei

A textil alapú napelemek, ha nagyipari gyártásuk megvalósulhat, széles körben felhasználhatók lesznek. Különlegesen nagy érdeklődés tapasztalható az intelligens ruházatokba beépített érzékelők iránt, például gyógyászati, katonai, sport- és szabadidőtevékenységek területén, amelyek villamos árammal való működtetéséhez egy, a ruházatba beépített napelem nagy szolgálatot tehet. Jól alkalmazhatók lesznek teherautó-ponyvák is, ahol áramot szolgáltathatnak a vezető által használt kisebb készülékek működtetéséhez, vagy sátrakon, hasonló céllal [2].

Példaképp megemlítjük, hogy a Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, a Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems, a Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. és néhány iparvállalat – köztük műszaki textiliákat gyártó cég is – közösen dolgozik üvegszál szövet alapú napelem kifejlesztésén [11]. Az alapanyag kiválasztásánál szem előtt kellett tartani, hogy a terméknek nagy szakítószilárdságúnak, olcsón előállíthatónak kell lennie, bírnia kell a további feldolgozás (rétegezési folyamatok) során alkalmazott, mintegy 200 °C hőmérsékletet, és meg kell felelnie a tűzvédelmi előírásoknak.

A kutatóknak meg kell oldaniuk azokat a problémákat, amelyek a napelemet alkotó vékony rétegek – az alsó elektróda, a fotovoltai réteg és a felső elektróda – szövetre való felvitelével járnak. Ezek a rétegek 1–10 µm vastagságúak, a szövet felülete ehhez képest a fonalkereszteződések folytán rendkívül egyenetlen. Ezért először egy ezt kiegyenlítő réteget visznek fel olyan eljárással, mint amit a szövetek gumírozásánál is használnak. Erre kerül a napelemet valójában alkotó többi réteg, amelyeket a textiliparban egyébként is alkalmazott kenési eljárásokkal visznek fel. Legfelülre egy rálaminált védőréteg kerül.

Az így készült kísérleti textil alapú napelem hatékonysága 0,1–0,3% körül van. Ahhoz, hogy a gyakorlatban használható terméket állítsanak elő, ezt 5% fölé kell emelni. A fejlesztések ebben az irányban nagy erővel folynak.

\*\*\*

A kísérletek nagy energiával folynak. Számos egyetem és kutatóintézet foglalkozik ezzel a témával Európától az Egyesült Államokon át Japánig és Kínáig, sokféle eljárást kipróbálnak és nagyon sok szakcikk ismerteti ezek eredményeit. Újabban azzal is kísérleteznek, hogy a villamos energia előállítását ne csak a ruhadarabba szerelt napelem

szolgálja, hanem egy ezzel együttműködő olyan egység is, amely a test mozgását alakítja át villamos energiává.

Mindezek a törekvések előbb-utóbb minden bizonynyal iparilag megvalósítható és kereskedelmi forgalomba is kerülő eredményekhez vezetnek.

## Felhasznált szakirodalom

- [1] Triplázódhat a világ napenergia-termelése 2021-re.  
<http://ecolounge.hu/zoldmotor/triplazodhat-a-vilag-napenergia-termelése-2021-re>
- [2] Mather, R.R., Wilson, J.I.B.: Fabrication of Photovoltaic Textiles.  
<https://www.mdpi.com/2079-6412/7/5/63>
- [3] *p-n átmenet*.  
[https://hu.wikipedia.org/wiki/P-n\\_%C3%A1tmenet](https://hu.wikipedia.org/wiki/P-n_%C3%A1tmenet)
- [4] Fényelem.  
<https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9nyelem>
- [5] 74. Hogyan működik a napelem? – Voyager: A tudomány határain.  
<https://voyager.blog.hu/>
- [6] Kiran Ranabhat, Leev Patrikeev et al.: An introduction to solar cell technology.  
<https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1451-4117/2016/1451-41171604481R.pdf>
- [7] Textile solar cells – Nanowerk (Nanowerk News).  
<https://www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=36860.php>
- [8] Wilson, J.I.B., Mather, R.R. et al.: Development of Flexible Solar Cells on Fabrics.  
<https://www.energy-learning.com/index.php/78-what-s-new/119-development-of-flexible-solar-cells-on-fabrics>
- [9] John I B Wilson, Robert R. Mathen: Photovoltaic Solar Textiles.  
<https://www.mdpi.com/2504-3900/32/1/4>
- [10] Neuer Rekord für Sonnenenergie im Juni 2019  
<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/neuer-rekord-fuer-solarenergie-im-juni-2019/>
- [11] Photovoltaic power from textiles.  
<https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2019/august/photovoltaic-power-from-textiles.html>
- [12] Recent coating materials for textile-based solar cells.  
<https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mater-sci.2019.2.234?viewType=HTML>
- [13] Zhen Wen, Min-Shin Yeh et al.: Self-powered textile for wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors  
<https://advances.science-mag.org/content/2/10/e1600097>
- [14] Flexible solar cells for clothing.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702106715425>