

NAPENERGIA-HASZNOSÍTÁS FOTOSZINTETIKUS RENDSZEREK SEGÍTSÉGÉVEL

Vass Imre

a biológiai tudomány doktora, igazgató,
MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont Növénybiológiai Intézet
vass.imre@brc.mta.hu

Bevezetés

Földünkön a legnagyobb potenciálú megújuló energiaforrás a Naptól származó fényenergia, ami a Föld egészére vonatkozóan éves átlagban 150 000 TW teljesítményt jelent. Így az emberiség jelenlegi éves igényeit potenciálisan kielégítő energiamentiség kevesebb mint egy óra alatt érkezik a Naptól a Föld felszínére (Lewis – Nocera, 2006). A napenergia fontos tulajdonsága, hogy a Földön lényegében mindenütt, a sarkvidéki régióktól eltekintve, jórészt egyenletesen, mindeki számára rendelkezésre áll.

A legnagyobb napenergia-átalakító rendszert a természetes fotoszintézis képviseli. Ennek során a fotoszintetikus baktériumok, algák és zöld növények a Nap fényenergiáját a légköri CO₂ megkötésére és szerves anyagokba történő beépítésére használják fel a vízből vagy más szerves forrásból származó elektronok felhasználásával. A fotoszintetizált vegyületek kémiai kötéseiben tárolt napenergia globálisan 125 TWév-re becsülhető, ami csaknem tízszeresen haladja meg az emberiség jelenlegi energiaigényét (kb. 15 TWév). A fotoszintézis mint energiaátalakító és -tároló

folyamat sikere elsősorban abból fakad, hogy a hozzá szükséges nyersanyagok (víz és CO₂), valamint a hajtóerő (napfény) gyakorlatilag kimeríthetetlen mennyiségben állnak rendelkezésre, a szerves vegyületek kötéseiben pedig akár százmillió éveken keresztül tárolható energia.

A fotoszintetikus napenergia-átalakítás elvi alapjait és gyakorlati lehetőségeit egy korábbi cikkben összegeztem a *Magyar Tudomány* hasábjain (Vass, 2010). A jelenlegi rövid összefoglaló célja az azóta elért új eredmények áttekintése ezen a nagyon gyorsan fejlődő területen.

A fotoszintetikus fényenergia-átalakítási folyamat

A fotoszintézis elsődleges fényenergia-átalakítási folyamatai membránokba ágyazott fehérjékből, pigmentekből és redox-aktív komponensekből álló komplexekben játszódnak le. A növények és algák kloroplasztiszaiban, valamint a cianobaktériumokban található tilakoid membránok kétfajta fényenergia-átalakító komplexet (az első, PS_I és a második, PS_{II} fotokémiai rendszer), az ún. citokróm b₆f komplexet, valamint ATP-szintáz tartalom-

maznak. A PS_{II} végzi a víz fényindukált elbontását, ami biztosítja a CO₂ szerves anyagokba történő beépítéséhez végső soron szükséges elektronokat és protonokat, meléktermekeként pedig a magasabb rendű életformák számára elengedhetetlen oxigént. A vízből kivont elektronok egy újabb fényindukált folyamat eredményeként a citb₆f és a PS_I komplexek közvetítésével nagy redukáló erejű molekulákba (NADPH), épülnek be, amelyek a CO₂ megkötéséhez szükségesek. Az ATP-szintáz pedig a szintén a CO₂ megkötéséhez és a sejtek egyéb energiaigényes folyamataihoz szükséges ATP szintézisét végzi. A folyamatot részletesebben áttekinti a korábbi cikkem (Vass, 2010).

Az elmúlt évek intenzív kutatásainak eredményeként mára ismertté vált a fotoszintetikus fényenergia-átalakításban részt vevő összes fehérjekomplex atomi felbontású térszerkezete, ami megnyitotta az utat a fotoszintetikus apparátus működésének szerkezetalapú megértéséhez.

Annak ellenére, hogy a fényelnyeléstől a CO₂ szerves anyagokba történő beépítéséig terjedő teljes fotoszintetikus folyamat elvi energetikai hatásfoka 30% körüli, a magasabb rendű növényekben természetes körülmények között a fényenergia fotoszintézis útján átlagosan 4,5%-os maximális elvi hatékonysággal alakítható át szerves vegyületek kötéseiben tárolt kémiai energiává (Thorndike, 1996). Az egyik legnagyobb energiaátalakítási hatékonyságú természetesen növény, a cukornád esetében azonban ez az érték a teljes tenyészidőre számolva csak 1%, míg bioreaktorban nevelt algák esetén 3% körüli (Blankenship et al., 2011).

A CO₂-megkötés, illetve a biomassza-képződés elméleti maximális hatékonysága és a természetes körülmények között elérhető ha-

tékonyosság közötti különbség jórészt a növényi életfunkciók következménye. A növények növekedése, szaporodása, különösképpen pedig a környezeti körülményekhez és stresszhatásokhoz történő adaptációja jelentős energiafelhasználást igényel. Így, e tényezők optimalizálásával igen jelentős tartalékok nyílnak meg a fotoszintetikus energiaátalakítás hatékonyságának növelésére.

Fotoszintézis-alapú energiatermelés

A növények, algák és fotoszintetikus baktériumok által előállított szerves anyagok kémiai kötéseiben tárolt napenergia felhasználásának legfontosabb módszerei a szerves anyag (biomassza) elégetése vagy bioüzemanyaggá (bioetanol, biodízel stb.) alakítása, a szerves elektronodonorból felszabadított elektronok felhasználása a protonok hidrogénné történő redukciójához, valamint biológiai és szerves komponenseket tartalmazó biokompozit, illetve a természetes fotoszintetikus rendszerek működési elvi alapján előállított mesterséges fotoszintetikus rendszerek alkalmazása.

Biomassza-égetés. Az emberiség által napjainkban felhasznált fosszilis energiahordozók forrása az evolúció korábbi szakaszai során fotoszintetikus úton képződött biomassza. Jelenleg kb. egymillió év alatt felhalmozódott biomasszának megfelelő fosszilis energiahordozót használunk fel évente, ami a légköri CO₂-mennyiség növekedésének elsődleges forrása. Ezzel szemben a természetesen növényekből származó biomassza elégetése nem növeli tartósan a légköri CO₂ mennyiségét, feltéve, hogy az adott területről kivágott és elégetett növényeket folyamatosan pótolják. Ezért a rövid tenyészidejű növényekből származó biomassza közel zérus CO₂-emissziójú energiatermelést tesz lehetővé, amit természetesen ront a biomassza előállításához és fel-

dolgozásához szükséges fosszilis energiahordozókból származó CO₂-kibocsátás.

A nagy hatékonyságú biomassza-előállítás feltételezi élelmiszer-termelésre nem használt mezőgazdasági területek és erdészeti melléktermékek hasznosítását, valamint új, genetikailag optimalizált energianövények kifejlesztését. Ezen a területen jelentős hazai kutatási eredmény a fotoszintetikus és biomassza-hatékonyság növelése az energiafűz genomjának kémiai kezelés által indukált duplikálása révén (Dudits et al., 2016).

Bioüzemanyagok. A biomassza közvetlen elégetése helyett célravezetőbb a fotoszintézis során képződött szerves anyag egy részének átalakítása magas energiatartalmú bioüzemanyaggá. A cukor és keményítő típusú anyagok fermentációjából a széles körben használt bioetanol állítható elő, amelynek termelése túlnyomórészt Brazíliában (cukornád) és az USA-ban (kukorica) történik. A növények lipid-, illetve olajtartalma pedig biodízellé vagy biokerozinná alakítható.

A magasabb rendű növények biomasszájából kinyerhető első generációs bioetanol vagy biodízel azonban több szempontból sem jelent optimális megoldást. Egyrészt jelentős probléma a fennmaradó biomassza hasznosítása, mivel a jelenlegi technológiák csak a sejtek cukor-, keményítő- és lipidtartalmának átalakítására alkalmasak. Másrészt a hagyományos bioüzemanyagok előállításához elengedhetetlen az élelmiszer-termelésre alkalmas területek igénybevétele. Mindezen tényezők, valamint a nem művelt területek energiacélú növénytermelésbe történő bevonása miatt jelentkező ökológiai károsodás (a biodiverzitás csökkenése) miatt a növényi biomassza energiacélú előállítása és felhasználása nem jelenthet hosszú távú megoldást a globális energiaproblémára. Ennek ellenére

a biomassza-alapú megújulóenergia-termelésnek fontos szerepe lehet mezőgazdasági melléktermékek felhasználásában és a fejlett mezőgazdaságú országok kiegészítő energia-termelésében.

A bioüzemanyag termelésében nagy előrelépést jelenthet a mikroalga-alapú módszerek széles körű elterjedése (Wijffels – Barbosa, 2010; Larkum et al., 2012). Egyrészt az algák fényenergia-átalakítási hatékonysága meghaladja a magasabb rendű növényekét. Másrészt nevelésük megoldható mezőgazdaságilag nem hasznosítható területeken (tengeri algák esetén az egyelőre korlátlanul rendelkezésre álló tengervízben). Szintén jelentős előny az, hogy a mikroalgákkal előállítható üzemanyagok választéka sokkal nagyobb, mint a magasabb rendű növények esetén, hiszen a bioetanol és biodízel mellett lehetőség van reptülőgép-üzemanyag (biokerozin), butanol, izoprén és hidrogén előállítására is (Prince – Ksheshgi, 2005; Liu et al., 2011; Dexter et al., 2015). Közülük kiemelt jelentősége lehet az illékony bioüzemanyagok (például izoprén és H₂) termelésének, mivel ez esetben a mikroalga-rendszerek folyamatos bioreaktor-üzemmódban működhetnek, ami csökkenti az alacsonyabb energiatartalmú maradék biomassza felhasználásából adódó problémákat. Igen fontos szempont az is, hogy a becslések szerint több mint 350 000 mikroalgafaj lehet a Földön (Larkum et al., 2012), amelyeknek még csak elenyésző töredéke van jellemezve, így ez a biodiverzitás hatalmas potenciált jelenthet nagy bioüzemanyag-hatékonyságú törzsek jövőbeli azonosítására. A mikroalgák, különösen a cianobaktériumok további fontos előnye, hogy e rendszerekben sokkal jobban kidolgozottak a szintetikus biológia módszerei, amelyek révén az energiaátalakítás hatékonysága a metabolikus útvon-

nalak (újra)tervezésével molekuláris szinten optimalizálható, mint a magasabb rendű növényekben.

A mikroalga-alapú bioüzemanyag ipari skálájú termelését egyelőre az limitálja, hogy a szárazföldi növények termesztésének évezredes hagyományaival és az utóbbi száz év folyamán végbement agrártechnológiai fejlődéssel szemben az alganevelés nagyüzemi módszereit csak most fejlesztik ki.

Biokompozit fotoszintetikus rendszerek. A természetes fotoszintetikus rendszerekben végbemenő életfolyamatok által az energiaátalakítási hatékonyságban okozott csökkenés kiküszöbölésének egyik lehetséges módja a közvetlen fényenergia-átalakítást végző fotokémiai komplexek kivonása és különböző hordozófelületeken történő immobilizálása. Az alkalmazott hordozófelületek lehetnek például aranyelektród, mezopórusos szilícium, In-Sn-oxid, szén nanocső, az immobilizált fotokémiai komplexek pedig PS1, PS2, bakteriális reakciócentrum, valamint hidrogenáz (Kato et al., 2011; Toporik et al., 2012; Yehezkei et al., 2014; Nagy et al., 2014). Az így létrehozott biokompozit-rendszerek nagy elvi energiaátalakítási hatékonyságot biztosítanak, elvesztik azonban az élő rendszerek folytonos megújuló képességét. Ezért fontos megoldandó probléma e rendszerek stabilitásának jelentős növelése.

A közelmúlt egyik jelentős eredménye volt ezen a területen egy olyan hibrid napenergia-átalakító rendszer kidolgozása, amelyben egy a Földön nagy mennyiségben található elemekből (Co, P) álló szervesetlen katalizátor, szilíciumalapú napelem által szolgáltatott áram felhasználásával képes a vizet molekuláris oxigénné és hidrogénné bontani. A keletkezett hidrogént egy fotoszintetikus baktérium hasznosítja elektronforrásként, amely-

nek felhasználásával szén-dioxidot köt meg, nagy hatékonysággal. A keletkezett biomassza jelentős része pedig megfelelően módosított metabolizmusú baktériumtörzsek alkalmazásával folyékony üzemanyaggá (izopropanol, izobutanol, 3-metil-1-butanol) alakítható. A teljes rendszer energetikai hatékonysága kb. 7% a tárolható folyékony üzemanyag szintjén (Torella et al., 2015), ami jóval meghaladja a természetes fotoszintetikus rendszerek hatékonyságát. Ez az érték elmarad ugyan a fotovoltaiikus rendszerek elektromosáram-termelő hatékonyságától (18–20%), illetve a napelem által termelt árammal hajtott elektrolízis hatékonyságától (kb. 10%, Blankenship, 2011), cserében viszont kiküszöböli a napenergia közvetlenül elektromos árammá konverálásából adódó tárolási problémát, illetve a H₂-felhasználás jelenleg még fennálló technológiai nehézségeit.

Bioinspirált, mesterséges fotoszintetikus rendszerek. A fotoszintézis-alapú energia- és üzemanyag-termelés talán legperspektivikusabb, egyben a legnagyobb tudományos kihívást is jelentő megközelítése a természetes rendszerek működésének megértésén alapuló bioinspirált mesterséges rendszerek kifejlesztése, amelyek képesek a Nap fényenergiáját vízbontásra és hidrogénfejlesztésre hasznosítani. Ez lehetővé tenné nemcsak az élő rendszerekre jellemző energiaátalakítási hatékonyság csökkenésének és a fotoszintetikus komplexek félmesterséges rendszerekben tapasztalható limitált stabilitásának kiküszöbölését, de az elektrontranszport reakcióutak optimális tervezése révén növelheti az elsődleges folyamatok hatékonyságát is. Az ilyen irányú kutatások eredményeként már sikerült létrehozni hidrogenáz aktivitású – azaz hidrogéntermelésre alkalmas – szintetikus komplexeket (Tard et al., 2005; Krassen et al., 2011).

A PS2-ben lejátszó fényindukált elektrontranszport elsődleges lépéseit utánzó szintetikus komplexeket is sikerült már kifejleszteni (Xu et al., 2005; Andreiadis et al., 2011), noha ezen rendszerek vízbontási hatékonyságának növelése még további kutatásokat igényel. A közelmúlt lényeges eredménye volt egy megvilágítás hatására külső elektromos feszültség jelenlétében a vizet hatékonyan bontó, ezért energiatárolásra alkalmazható, szintetikus foto-elektro-katalizátor létrehozása (Kanan – Nocera, 2008; Reece et al., 2011). Kifejlesztés alatt vannak továbbá olyan, a fotoszintetikus rendszerek elvei által inspirált szilárdtestalapú eszközök is, amelyek vízbontásra és H₂-fejlesztésre is képesek (Sanderson, 2008).

Következtetések

Az emberiség energiaproblémáinak hosszú távú megoldása elképzelhetetlen a fosszilis energiahordozókat kiváltó alternatív energiaforrások nagymértékű felhasználása nélkül. A napenergia hatalmas mennyiségben rendelkezésre álló energiaforrás, amelynek a természetes fotoszintézis által történő hasznosítását Földünkön az evolúció évmilliárdok során optimalizálta. Jelenleg a fotoszintetikus rendszerek által átalakított és tárolt napenergia felhasználásának a légköri szén-dioxid mennyiségét tartósan nem növelő módszerei a növényekből származó biomaszra elégetése vagy bioüzemanyaggá (bioetanol, biodízel)

való alakítása. Mivel az energiacélú és élelmezési célú növénytermelés ugyanazokért a mezőgazdaságra alkalmas földterületekért verseng, e módszerek alkalmazása globális szinten csak átmeneti megoldást jelenthet. Ezért a fotoszintetikus napenergia-hasznosításra irányuló kutatások elsődleges célja tárolható üzemanyagok (folyékony vagy illékony szénhidrogének, hidrogén) előállítására mezőgazdasági tevékenységre nem alkalmas területeken energiatermelésre optimalizált természetes vagy mesterséges rendszerekkel. A fotoszintetikus fényenergia-átalakítás mechanizmusának megértésében az utóbbi években elért szerkezet-funkció alapú áttörés, a szintetikus kémia, szintetikus biológia, anyagtudományok és nanotechnológia területén bekövetkezett rohamos fejlődéssel együtt jó alapot szolgáltat arra, hogy a biológiai rendszerek által évmilliárdok óta sikeresen használt fényenergia-átalakítási mechanizmusok alkalmazhatók legyenek az emberiség energiaigényeinek kielégítésére. Az ebben a témában korábban írt áttekintés (Vass, 2010) óta történt tudományos és technológiai fejlődés jó alapot szolgáltat arra, hogy a fotoszintetikus rendszerek felhasználásával történő ipari mértékű napenergia-hasznosítás elvi lehetőségéből gyakorlati realitássá váljon.

Kulcsszavak: megújuló energia, napenergia-hasznosítás, fotoszintézis, hidrogéntermelés

IRODALOM

- Andreiadis, Eugen S. – Chavarot-Kerlidou, Murielle – Fontecave, Marc – Artero, Vincent (2011): Artificial Photosynthesis: From Molecular Catalysts for Light-driven Water Splitting to Photoelectrochemical Cells. *Photochemistry and Photobiology*. 87, 946–964. DOI: 10.1111/j.1751-1097.2011.00966.x • <http://tinyurl.com/mn62rn8>
- Blankenship, Robert E. – Tiede, David M. – Barber, James et al. (2011): Comparing Photosynthetic and Photovoltaic Efficiencies and Recognizing the Potential for Improvement. *Science*. 332, 805–809. DOI: 10.1126/science.1200165 • <http://tinyurl.com/kn9sngo>
- Dexter, Jason – Armslaw, Patricia – Sheahan, Con – Pembroke, J. Tony (2015): The State of Autotrophic Ethanol Production in Cyanobacteria. *Journal of Applied Microbiology*. 119, 11–24. DOI: 10.1111/jam.12821 • <http://tinyurl.com/m9x2feh>

- Dudits Dénes – Török Katalin – Cseri András et al. (2016): Response of Organ Structure and Physiology to Autotetraploidization in Early Development of Energy Willow *Salix viminalis*. *Plant Physiology*. 170, 1504–1523. DOI: 10.1104/pp.15.01679 • <http://www.plantphysiol.org/content/170/3/1504.full.pdf+html>
- Kanan, Matthew – Nocera, Daniel G. (2008): In Situ Formation of an Oxygen-Evolving Catalyst in Neutral Water Containing Phosphate and CO₂. *Science*. 321, 1072–1075. DOI: 10.1126/science.1162018 • <http://tinyurl.com/mzdn438>
- Kato, Masaru – Cardona, Tanai – Rutherford, Alfred William – Reisner, Erwin (2012): Photoelectrochemical Water Oxidation with Photosystem II Integrated in a Mesoporous Indium-Tin Oxide Electrode. *Journal of the American Chemical Society*. 134, 8332–8335. DOI: 10.1021/ja301488d • <http://tinyurl.com/kqjnjum3>
- Krassen, Henning – Ott, Sascha – Heberle, Joachim (2011): In Vitro Hydrogen Production—Using Energy from the Sun. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 13, 47–57. DOI: 10.1039/C0CP01163K • <http://tinyurl.com/n7totuy>
- Larkum, Anthony W. D. – Ross, Ian L. – Kruse, Olaf – Hankamer, Ben (2012): Selection, Breeding and Engineering of Microalgae for Bioenergy and Biofuel Production. *Trends in Biotechnology*. 30, 199–205. DOI: 10.1016/j.tibtech.2011.11.003 • <http://tinyurl.com/kyplbcl>
- Lewis, Nathan S. – Nocera, Daniel G. (2006): Powering The Planet: Chemical Challenges In Solar Energy Utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 103, 15729–15735. • <http://tinyurl.com/l5d92p4>
- Liu, Xinyao – Sheng, Jie – Curtiss, Roy (2011): Fatty Acid Production in Genetically Modified Cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 108, 6899–6904. doi: 10.1073/pnas.1103014108 • <http://tinyurl.com/lvfdwsq>
- Nagy László – Magyar Melinda – Szabó Tibor et al. (2014): Photosynthetic Machineries in Nano-systems. *Current Protein and Peptide Science*. 15, 363–373. DOI: 10.2174/1389203715666140327102757 • <http://tinyurl.com/lwgoxjv>
- Prince, Roger C. – Khesghi, Haroon S. (2005): The Photobiological Production of Hydrogen: Potential Efficiency and Effectiveness as a Renewable Fuel. *Critical Reviews in Microbiology*. 31, 19–31. DOI: 10.1080/10408410590912961 • <http://tinyurl.com/m7dh695>
- Reece, Steven Y. – Hamel, Jonathan A. – Sung, Kimberly et al. (2011): Wireless Solar Water Splitting Using Silicon-based Semiconductors and Earth-abundant Catalysts. *Science*. 334, 645–648. DOI: 10.1126/science.1209816 • <http://science.sciencemag.org/content/334/6056/645.full>
- Sanderson, Katherine (2008): The Photon Trap. *Nature*. 452, 400–402. doi:10.1038/452400a • <http://www.nature.com/news/2008/080326/full/452400a.html>
- Tard, Cédric – Liu, Xiaoming M. – Ibrahim, Saad K. et al. (2005): Synthesis of the H-cluster Framework of Iron-Only Hydrogenase. *Nature*. 433, 610–613. doi:10.1038/nature03298 • <http://www.nature.com/nature/journal/v433/n7026/abs/nature03298.html>
- Thorndike, Edward H. (1996): *Energy and the Environment. A Primer for Scientists and Engineers*. Reading, MA: Addison-Wesley
- Toporik, Hila – Carmeli, Itai – Volotsenko, Irina et al. (2012): Large Photovoltage Generated by Plant Photosystem I Crystals. *Advanced Materials*. 24, 2988–2991. DOI: 10.1002/adma.201200039
- Torella, Joseph P. – Gagliardi, Christopher J. – Chen, Janice S. et al. (2015): Efficient Solar-to-fuels Production from a Hybrid Microbial–water-splitting Catalyst System. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 112, 2337–2342. • <http://tinyurl.com/kv556wc>
- Vass Imre (2010): Megújuló fotoszintetikus energiatermelés napfényből és vízből – Elvi lehetőség vagy gyakorlati realitás? *Magyar Tudomány*. 171, 11, 1344–1353. • <http://www.matud.iif.hu/2010/11/08.htm>
- Wijffels, René – Barbosa, Maria J. (2010): An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science*. 329, 796–799. doi: 10.1126/science.1189003 • <http://tinyurl.com/mbpl7m3>
- Xu, Yunhua – Eilers, Gerriet – Borgström, Magnus et al. (2005): Synthesis and Characterization of Dinuclear Ruthenium Complexes Covalently Linked to Ru-II Tris-bipyridine: An Approach to Mimics of the Donor Side of Photosystem II. *Chemistry A European Journal*. 11, 7305–7314. DOI: 10.1002/chem.200500592 • <http://tinyurl.com/k6p3gx9>
- Yehezkeili, Omer – Tel-Vered, Ran – Michaeli, Dorit et al. (2014): Photosynthetic Reaction Center-functionalized Electrodes for Photo-bioelectrochemical Cells. *Photosynthesis Research*. 120, 71–85. DOI: 10.1007/s11120-013-9796-3 • <http://tinyurl.com/ldlllptd>