

# Tiszta, megújuló energia a biohidrogén

Az ismert gáz halmaz-  
állapotú üzemanyagok

közül egységnyi tömegre vonatkoztatva a hidrogén rendelkezik a legnagyobb energia-tartalommal (143 GJ/tonna).

A legegyszerűbb kémiai szerkezettel rendelkező molekulára, a hidrogénre ( $H_2$ ) ma már világszerte úgy tekintenek, mint az egyik olyan energiahordozóra, amely az emberiség fenntartható fejlődése érdekében képes lesz kiváltani a fosszilis energiahordozókat. Ha a  $H_2$ -t megújuló forrásokból állítjuk elő, használata megszabadíthat bennünket a globális felmelegedés okozta környezeti katasztrófáktól, és megszüntetheti sok háborús konfliktus kiváltó okát. A hosszabb távra tervező országok növekvő és tekintélyes összegeket költenek a  $H_2$ -gazdaság bevezetését elősegítő kutatásokra, fejlesztésekre, demonstrációs projektekre és a szükséges infrastruktúra kiépítésére.

A  $H_2$  – akárcsak az elektromos áram – egy olyan energiahordozó, amelyiket nem lehet a megszokott módszerekkel bányászni.  $H_2$ -t vízből vagy szerves anyagokból nyerhetünk külső, primer energiaforrás felhasználásával. Manapság a legtöbb  $H_2$ -t fosszilis energiahordozókból állítják elő, elsősorban földgázból, ami az energetikai, környezeti és politikai problémákat alapvetően nem oldja meg.  $H_2$ -t lehet azonban termelni már ma is megújuló primer energiaforrásból elfogadható hatásokkal: a biotechnológiai megoldások és rendszerek gyors fejlődése komoly ígéret a jövő  $H_2$ -alapú gazdasága számára. A  $H_2$  és elektromos áram abban is hasonlít egymásra, hogy energiahordozóként mindkettő komoly tárolási feladatot igényel. Számos megoldás létezik különféle fejlettségi fokon, ráadásul a két tiszta energiahordozó-féleség kis veszteséggel egymásba is átalakítható víz-elektrolí-

zissel, illetve az ún. üzemanyag-cellákban, igény és szükség szerint.

## FOTOSZINTÉZIS MINT BIOREAKTOR

Létezik a természetben olyan biológiai rendszer, amely az evolúció évmilliói alatt a nehezen megfogható napenergia kémiai energiává alakításának képességét fejlesztette ki. A fotoszintézis kulcsfontosságú energia-raktározási és szervesanyag-felépítési folyamat, amely a biomasszát a globális felmelegedést okozó légköri szén-dioxid átalakításával hozza létre. A fotoszintézis adja a Föld évi szervesanyag-termelésének túlnyomó részét. A jól ismert növények mellett rengeteg, kicsi mérete miatt kevésbé szembetűnő fotoszintetizáló élőlény lakik a Föld felszínének zömét kitevő vizekben. A közvetlen fényenergia-hasznosítás szempontjából a fotoszintetizáló mikroszkopikus élőlények (algák, baktériumok) jönnek elsősorban számításba, mert viszonylag gyorsan, nagy tömegben és olcsón tenyészthetők.

A zöld növények és algák jó része a megkötött fényenergiát első lépésben vízbontásra használja fel, a vízből oxigéngáz, emellett a kémiai energiát hordozó elektronok, valamint protonok keletkeznek. Az elektronokban átmenetileg raktározott kémiai energia akkor stabilizálódik, amikor valamilyen szerves molekula szintéziséhez használódik fel, így cukrok, aminosavak, nukleinsavak, végső soron egy új fotoszintetizáló élőlény képződik. A folyamat végterméke, amit biomasszának is hívunk, jelentős mennyiségű,

kémiai kötésekben raktározott napenergiát tartalmaz.

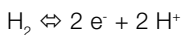
Az ember számára hasznos energiaátalakító-rendszerhez elvileg az egész, bonyolult folyamat első része elegendő, a vízbontás utáni lépések során az energiatermelés szempontjából egyre több a veszteség. Energetikailag leggazdaságosabb megoldás a vízbontás során képződő elektronok és protonok egyesítése hidrogénné. Fotoszintetikus energiaátalakító rendszerünkben tehát a napenergia formájában rendelkezésre álló energiát vízbontásra, oxigén- és hidrogéngáz előállítására fordítjuk. Az  $O_2$  és  $H_2$  – egymástól elkülönítve – viszonylag jól szállítható és tárolható. A felhasználás helyén az  $O_2$  és  $H_2$  elégetésekor a megkötött napenergia felszabadul, az égés során víz keletkezik belőlük. Így a gyakorlatilag kimeríthetetlen Napot egy olyan körfolyamatban tesszük energetikailag hasznosíthatóvá, amelyben a tároláskor vizet bontunk összetevőire, a felhasználáskor pedig a komponensekből vizet állítunk elő (1. ábra).

A feladat ellátására alkalmas biológiai rendszer a természetben nem létezik. Ennek oka az, hogy a biológiai rendszerek számára egy vízből  $O_2$ -t és  $H_2$ -t gyártó feladatsor teljesen értelmetlen. Könnyen belátható, hogy a reprodukcióra, a saját faj minél szélesebb körben való elterjesztésére "programozott" élő rendszerek a rendelkezésükre álló, változatos és felfogható molekuláris szabályozó mechanizmusok bevetésével igyekeznek elkerülni azt az állapotot, amelyben aktivitásuk arra fordítódna, hogy az életük és a faj fenntartása szempontjából értéktelen, ezért végső soron a környezetbe kibocsátott  $O_2$ -t és  $H_2$ -t állítsanak elő a nehezen megszerzett napenergiából. Ezért a természetben a kívánatos rendszer elemeit megtaláljuk ugyan, de az egyes elemek különálló fajokban fordulnak elő. Átmeneti megoldás létezik például a cianobaktériumok körében, ahol a vízbontás és  $H_2$ -termelés lépései ugyanazon faj elkülönült sejtjeiben, térben szétválasztódnak, ezzel előnyösen használható rendszer jön létre. A hosz-

szű távú stratégia a vízbontással oxigént és  $H_2$ -t termelő mikroorganizmusok mesterséges kifejlesztése, a molekuláris biológia módszereivel való létrehozása lehet. Ez elvileg és technológiailag ma már nem lehetetlenül bizonyult feladat, bár a rendelkezésre álló ismeretanyag birtokában az ipari szinten használható rendszerek létrehozása 5-8 éven belül valószínűtlen. A fotoelektromosság vagy a nukleáris energia kutatásához és hasznosításához hasonlóan komoly alapvetési tevékenységnek kell megelőznie a folyamat széleskörű felhasználását. **Ez egy globális kutatás-fejlesztési összefogást igénylő feladat, amiben Magyarországnak ki kell vennie a részét, ha nem akarunk energetikailag kiszolgáltatott országot a következő generációra hagyni.**

### AZ ÓSI HIDROGENÁZ

Mint a legtöbb biológiai feladatot, a  $H_2$ -képződést is egy enzim katalizálja, amit hidrogenáznak nevezünk. A hidrogenáz az evolúció időskáláján ősi enzimeknek számít, elsősorban baktériumokban és algákban találjuk meg, később eltűnt azzal párhuzamosan, hogy a redukáló légkört az evolúció magasabb fokán az oxigént tartalmazó atmoszféra váltotta fel. A hidrogenáz enzim egy olyan fehérje, amely a természetben előforduló leg egyszerűbb molekula, a  $H_2$  képződését vagy elbontását végző katalizátor,

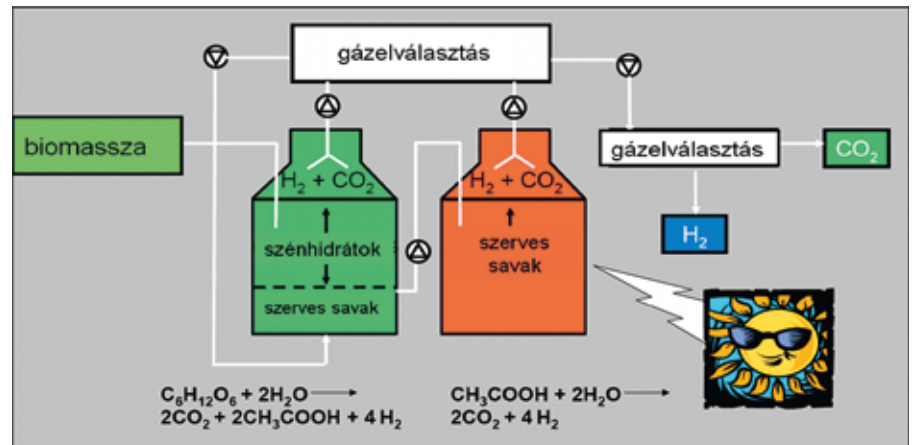


de az egyszerűnek tűnő feladatot az enzim meglehetősen összetett molekuláris mechanizmus szerint oldja meg. Az ismert hidrogenázok zöme fématomokat tartalmazó enzim. Az élő szervezetben a fémeteket körülvevő különleges és bonyolult elrendezésű fehérjemolekula, a fehérje és a fématomok közötti kölcsönhatás ruhazza fel a molekulába zárt fématomokat azzal a képességgel, hogy a  $H_2$ -gyártás vagy -bontás elemi lépéseit katalizálni tudják. A kutatás központi feladata ezért a fehérje és a hozzá kötött fémetek közötti kölcsönhatás törvényszerűségeinek megismerése ezekben a metalloenzimekben.

A fotoszintetikus energia-átalakítás hatásfoka az élő rendszerekben aligha tudja meghaladni a 10%-ot. A jóindulatúan is csak szerénynek mondható hatásfok oka az, hogy valójában az egész rendszer hatékonyságát a lassú sötét reakciók limitálják, a fényenergia elnyelése ennél sokkal jobban tudna működni.

A  $H_2$  biotechnológiai előállítása egy másik enzim, a nitrogenáz segítségével is lehetséges. A nitrogenáz viszont olyan sok kémiai energiát igényel a reakció katalizálásához, hogy az egész dolog energetikailag ráfizetés a sejt számára. Meg kell itt jegyezni, hogy érdekes kutatások folynak *in vitro* rendszerek kifejlesztésével kapcsolatban is. Ilyenkor az élő sejtekből kinyert komponenseket (fotoszintetizáló komplexeket és hidrogenázokat)

2. ábra



próbáljuk meg közös munkára bírni. Az *in vitro* megoldás előnye az, hogy megszabadulunk az élő rendszerekben ellenünk dolgozó molekuláris szabályozó mechanizmusoktól, hátránya azonban a komponensek stabilitásának gyors elvesztése. A biomérnökökre vár az a feladat, hogy időközben megoldják az olcsó, nagy felületet betakaró fotobioreaktorok előállításának problémáját.

### FERMENTÁCIÓS $H_2$ -TERMELÉS

Sok mikroba képes arra, hogy szerves anyagokat hasznosítva, fermentációval azokat átalakítva szerezze meg a fennmaradásához és szaporodásához szükséges energiát és nyersanyagokat. A fermentáció energetikailag nem a leghasznosabb, de jól megoldható anyagcsereforma, a feleslegben keletkező energiától a sejtek viszonylag egyszerűen,  $H_2$  formájában szabadulnak meg. A fermentatív  $H_2$ -termelés esetében tehát található a termelőbaktérium és az energiára vágyó ember érdeke. Sok mindent tudunk a folyamatról és a benne szereplő enzim-katalizátorokról egyaránt. A fermentatív  $H_2$ -termelésnek az ember szempontjából egy hibája van: a sejtek csak azt a kémiai energiát fordítják  $H_2$ -termelésre, ami számukra feleslegként jelentkezik. Különbőféle, az anyagcsere útvonalakat befolyásoló molekuláris biológiai csalafintaságokkal azért rá lehet őket venni a szorgosabb  $H_2$ -termelésre, ami nem teszi tönkre a sejtek túlélését.

**ÖSSZEGEZVE**, azt mondhatjuk, hogy az élő szervezetek különböző utakon termelhetnek jelentős mennyiségű  $H_2$ -t. Ezek közül több önmagában vagy kombinálva a mai tudásunk alapján is képes gazdaságosan megújuló  $H_2$ -termelésre. Például egy ilyen rendszer ipari kifejlesztésére vállalkozott az a 11 országban az EU támogatásával működő 24 kutató-fejlesztő és ipari partner, akik a biomasszát kétféle fermentációval alakítják át hidrogénné. Az első fermentorban (2. ábra) a biomasszát 70-80 °C hőmérsékleten szorgoskodó baktériumok  $H_2$ - $CO_2$  gázkeverékké és szerves savakká alakítják át. Az utóbbiakat a második, szobahőmérsékleten működő fermentorban

fényenergia felhasználásával fotoszintetizáló baktériumok tovább bontják, a termék szintén  $H_2$ - $CO_2$  gázkeverék. Végeredményben a napenergia közvetett (növényi biomassa) és közvetlen (fotoszintetizáló baktériumok) hasznosításával a biomasszában raktározott kémiai energia 65-70%-át tudjuk hidrogénné alakítani, ami közel van az elméletileg várható felső határhoz, hiszen valamennyi energiát a baktériumoknak is hagyni kell az életük fenntartásához. A konzorcium tagjaként mindkét fermentációs lépésben szerepet kapó mikroba "okosításában", azaz új, hatékonyabban és stabilabban dolgozó mikrobák előállításában részt vállalt a Szegedi Tudományegyetem Biotechnológiai Tanszékén dolgozó csapat. Jelenleg a technológia élettartamának növelése, a működési stabilitás fokozása és léptéknövelő ipari fejlesztés folyik.

Az új energiahordozó elterjedését kezdetben mindenképpen támogatni kell. Ennek indoklását az alábbi, valós történet adja meg könnyen belátható módon. Az USA törvényhozásának egyik bizottsága az ország hosszú távú fejlesztési stratégiáját dolgozza ki, tudósok közreműködésével. (Ebben egyrészt érdekes az, hogy ott ilyesmivel is komolyan foglalkoznak a törvényhozók. Másrészt figyelemre méltó, hogy ott a döntéshozók a szakemberek, tudósok véleményét komolyan veszik, ami nálunk szintén ritka jelenség.) A bizottság meghallgatta többek között a hidrogénalapú gazdaság egyik neves kutatóját, aki lelkesen ecsetelte a várható előnyöket, de azt sem hallgatta el, hogy az új energiahordozó központi támogatásra szorul. Az egyik szenátor erre megjegyezte, hogy Amerika a szabad piac hazája, és ha a hidrogén olyan kiváló, mint állítják, akkor ki kell vinni a piacra, és magától győzedelmeskedni fog. A tudós válasza ez volt: Szenátor úr, ha Önök hoznak ma egy törvényt, amellyel minden termék árába beépítik az általa okozott környezeti károkat, holnap már senki sem fog olaját venni, hanem csak hidrogént!

**KOVÁCS KORNÉL, FÜLÖP ANDRÁS, HERBEL ZSÓFIA, NYILASI ANDREA, RÁKHELY GÁBOR**  
Szegedi Tudományegyetem, Biotechnológiai Tanszék és MTA Szegedi Biológiai Központ