

# Az atomerőművek szerepe a hidrogén-előállításban

Utilization of nuclear power plants for hydrogen production

Imre Attila Rikárd<sup>a</sup>, Horváth Ákos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Energiatudományi Kutatóközpont, Tudományos Tanács elnöke, imre.attila@ek-cer.hu;  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, tanszékvezető, egyetemi tanár, imreattila@energia.bme.hu  
<sup>b</sup>Energiatudományi Kutatóközpont, főigazgató, horvath.akos@ek-cer.hu

## Kulcsszavak

elektrolízis,  
vízbontás,  
hidrogén gazdaság,  
napelempark,  
hulladék hő

## Keywords

electrolysis,  
water splitting,  
hydrogen economy,  
photovoltaic system,  
waste heat

## Absztrakt

A közeljövőben a hidrogén – ezen belül a zöld hidrogén – iránti igények meredek növekedése várható. Egyrészt a jelenlegi, fosszilis eredetű hidrogénre épülő igényeket kell kiváltani, másrészt a felmerülő új igényeket (közlekedés, energiatárolás) is ki kell elégíteni. Ehhez elengedhetetlen a megbízható, kiszámítható hidrogéntermelés, ami a hagyományos megújuló alapú villamosenergiára alapozva egyelőre nehezen kivitelezhető. Ebben a rövid cikkben bemutatjuk, hogyan lehet az atomerőművek bevonásával, de a megújulókat is megtartva, gyors megoldást adni a fenti problémára.

## Abstract

In the near future, demand for hydrogen – including green one – is expected to increase sharply. Current demand based on fossil hydrogen will have to be replaced, while new emerging needs (transport, energy storage) have to be fulfilled. This requires reliable and predictable hydrogen production, which is currently difficult to achieve based on solely conventional renewable electricity. This short article will show a simple solution to this problem, using electricity partly from nuclear power plants.

## 1. Bevezetés

A jövőben mind a vegyiparban, közlekedésben, energetikában egyre nagyobb szerepe lesz a zöld hidrogénnek. Egyes helyeken jelenleg is intenzív a hidrogén-felhasználás; pl. a nagyüzemi mezőgazdasághoz nélkülözhetetlen műtrágya gyártásában. Jelenleg ezt a szükségletet fosszilis eredetű (a földgáz metán-tartalmából készült) hidrogénnel oldják meg, de ez a forrás nem karbonmentes és nem megújuló. Más területeken (közlekedés, energetika) a hidrogén szerepe korábban elhanyagolható volt, de a közeljövőben ez megváltozik. Az üzemanyagként való felhasználása egyre szélesebb körű: már hazánkban is vannak hidrogénnel hajtott autók, kishajók és buszok; a közeljövőben várható a kamionok, vonatok és nagyobb hajók megjelenése is [1]. Ennek csak egyik oka a környezetvédelem; a másik az, hogy fosszilis üzemanyagokkal egyre kevésbé lehet ellátni a növekvő igényeket. Mind a vegyipar, mind a közlekedés igényeit így más hidrogén-forrásból kell kielégíteni és erre a következő években-évtizedekben a legjobb módszernek a víz bontása tűnik [2,3].

2020-ban Magyarországon 160 ezer tonna hidrogént állítottak elő (emellett még volt kb. 100 ezer tonna, melléktermékként keletkező hidrogén is). A 160 ezer tonna kizárólag szürke hidrogén volt, azaz metánból állították elő gőzreformálással, keletkező széndioxid megfogása nélkül. 115 ezer tonnát a mezőgazdaság (a műtrágyához szükséges ammónia gyártása), 20 ezer tonnát a vegyipar és 25 ezer tonnát a kőolaj-finomítók használtak fel. 2050-re a termelést szeretnék 580 ezer tonnára növelni (emellett továbbra is kb. 100 ezer tonnányi hidrogén keletkezik, melléktermékként). Az 580 ezer tonnából 473 ezer tonna zöld hidrogén lenne, amit vízből állítanak elő, zöld-energia befektetésével és CO<sub>2</sub>-kibocsátás nélkül. A maradék 107 ezer tonna a tervek szerint kék hidrogén lenne; itt a gyártás közben keletkezne CO<sub>2</sub>, de azt megfogják és eltárolják, azaz a légkör irányába a CO<sub>2</sub> kibocsátás nulla lenne. A megtermelt 580 ezer tonnából ammóniagyártásra 133 ezer tonna fordítódna, a vegyipar 24 ezer tonnát,

míg az addigra jelentősen összezsugorodott kőolaj-finomítás 9 ezer tonnát igényelne. Emellett megjelennének az új igények, úgymint 75 ezer tonna az acélgépjárműgyártáshoz, 212 (!) ezer tonna a közlekedéshez, 120 ezer tonna "bekeverés, kiváltás" (azaz a földgáz helyettesítése bizonyos területeken), míg 7 ezer tonna a cementipar és a hozzá kapcsolódó iparágak igényeit fedezné [4]. Az új igények közül a két nagy a közlekedés (hidrogénüzemű járművek, beleértve a teherfuvarozást is), valamint a földgáz kiváltása (beleértve a szezonális energiatárolást is). A hidrogén fontos szerephez juthat az energiatárolásban, hisz a jelenlegi tudásunk szerint egy nagyobb város több napos vagy hosszabb idejű ellátására képes tároló csak úgynevezett Power-to-Gas alapú lehet [5]. Mindemellett fontos megjegyezni, hogy jelenleg a hidrogén hosszabb idejű, nagy mennyiségű tárolása még nehézkes [6], de napos-hetes tárolásra [7], illetve "közvetett módon" (azaz mikor a hidrogénből könnyebben tárolható tüzelőanyagot, pl. metánt [8] vagy ammóniát [9] állítanak elő) szezonális tárolásra már most is alkalmazható lenne.

Látható, hogy az igények nagyok, de vajon mi lehet a megoldás, hogyan tudunk megfelelő mennyiségű "zöld" hidrogént gyártani?

**1. táblázat: Hidrogén-termelési technológiák** (normál: víz-alapú; dől: metán alapú; vastag: szén alapú; aláhúzott: egyéb szerves alapú)

Piacérett	Ígéretes	Kísérleti
Elektrolízis - alkáli	Elektrolízis - SOE	Biológiai
Elektrolízis - PEM	<i>Metán szárazreformálás</i>	fotokatalitikus
<i>Metán gőzreformálás</i>	Termikus vízbontás	elektrohidrogenezis
	Termokémiai - vizes	fotoelektrokémiai
	<u>Termokémiai - szerves</u>	radiolízis
	<u>Részleges oxidáció (syngas-előállítás)</u>	
	<b>Szén elgázosítás</b>	
	<u>Biomassza elgázosítás</u>	

Az 1. táblázatban a jelenleg ismert hidrogén-előállítási eljárásokat igyekeztünk összefoglalni [10, 11]. Feltüntetjük

az alapanyagokat (víz, földgáz metánja, szén, illetve egyéb szerves anyag); természetesen egyes esetekben (pl. a szenes módszernél) szintén szükség van vízre. Ha zöld hidrogént akarunk gyártani, akkor a kiinduló anyag víz vagy biomassza lehet; ez utóbbi az "egyéb szerves anyag" kategóriába sorolható. Figyelembe véve a rendelkezésre álló biomassza korlátos voltát, valamint az ezt használó piacérett technológia hiányát, valószínűsíthető, hogy a közeljövőben nem a biomassza-alapú módszerek lesznek az elsődleges zöld-hidrogént előállító módszerek, így a továbbiakban inkább a víz alapúakra koncentrálnak. Ezek közül szintén kizárjuk a még kísérleti stádiumban levőket, hisz esetükben legfeljebb csak találgatni lehet arról, hogy ipari méretekben valaha is használhatóvá válnak-e. Így maradt két piacérett elektrolízis-alapú technológia (alkáli és PEM), valamint három ígéretes technológia, a magas hőmérsékletű elektrolízis (SOE), a termikus vízbontás, valamint a víz alapú termokémiai technológiák.

## 2. Az atomenergia szerepe a hidrogén-előállításban

Az atomerőművek/atomreaktorok esetében három "termék" lehet, ami felhasználható a hidrogén-előállításban: a kijövő villamosenergia, a kijövő hő és a sugárzás. A harmadikkal nem foglalkozunk; a radiolízis-alapú vízbontás várhatóan nem lesz ebben az évszázadban releváns.

### 2.1 A megtermelt hő hasznosítása

Hidrogén-előállításnál hőre több technológiánál is szükség van; gyakran ez az egyetlen hajtóerő, gyakran pedig csak elősegíti a folyamatot.

Elsőként vizsgáljuk meg a termikus vízbontást [12]. Talán ez tűnik a legtriviálisabb hő-alapú megoldásnak. Tudni kell, hogy – sok más kémiai reakcióhoz hasonlóan – nem definiálható olyan hőmérséklet-határ, ami alatt a víz bomlik, felette viszont nem. Már szobahőmérsékleten is előfordul, hogy egy vízmolekula szétesik (vagy éppen keletkezik), de ezen a hőmérsékleten a keletkező hidrogén mennyisége elhanyagolható. 800-1200 °C tartományban már jól észlelhető a gázképződés, de dominánssá csak a 2500-3000 °C tartományban válik.

A fenti hőmérsékletek mindegyike elvileg elérhető nukleáris bomlással, de kérdés, hogy ezt a gyakorlatban is meg lehet-e tenni. A vízbontásnak mindenképp a reaktoron kívül kell zajlania, azaz a hőt valahogy ki kell hozni. Teljesen egyértelmű, hogy olyan reaktoroknál, ahol a víz a moderáló/hűtőközeg, ott a reaktor belsejében nem lehet olyan hőmérséklet, ahol a víz már elbomlana, így ilyen hőmérsékletű hő a reaktoron kívülre sem juttatható. A negyedik generációs reaktorok között van megfelelően magas hőmérsékletű, ahol a hűtőközeg sóolvadék vagy hélium; itt megoldható az 1000 °C körüli kimeneti hőmérséklet, így nem kizárt, hogy a jövőben építhetők olyan reaktorok, amelyeknél a keletkező hő termikus vízbontásra hasznosítható. A jelenleg működő, vagy a közeljövőben tervezett atomerőművek viszont nem alkalmasak erre a célra.

A fenti módszereknél egy hátrányt még meg kell

említenünk (ami a lentebbi módszerek egy részére is igaz), mégpedig azt, hogy a hidrogén és oxigén térben ugyanott keletkezne, robbanásveszélyes keveréket képezve. Ez utóbbi nem túl szerencsés, főként azért, mert a magas hőmérsékletű hő csak nagy veszteséggel lenne messzire szállítható, így a hidrogén-előállítás valószínűleg a reaktorokhoz közel történne, ami nagyon komoly biztonsági kihívást jelentene.

Másodikként a vizes termokémiai módszereket vizsgáljuk meg [13]. Ezekben a folyamatokban a vízbontás nem a víz-molekula közvetlen szétesésével, hanem más kémiai reakcióval (pl. kén-jód ciklus) történik; ezen reakciók viszont megfelelő sebességgel csak magas hőmérsékleten játszódhatnak le; a jelenleg ismert-használt folyamatok 600-900 °C tartományában. Ezen esetekben a reaktorból kijövő hőnek a folyamat fenntartásához szükséges hőt kellene biztosítania. Sajnos ezen reakciók többségénél a megkívánt hőmérséklet még mindig túl magas ahhoz, hogy pl. egy nyomottvízes reaktor primer köréből kijövő hővel biztosítható legyen. Ez esetben is igaz, hogy új típusú (negyedik generációs) reaktoroknál elképzelhető olyan koncepció, amikor a hő egy része villamosenergia-termelésre, más része pedig termokémiai alapú hidrogéntermelésre fordítódik. Emellett lehetséges, hogy a jövőben találnak olyan reakciót, amihez egy nyomottvízes reaktor primerköri vízhőmérséklete is elegendő lehet.

Az eddigiek alapján úgy tűnik, hogy a jelenleg üzemelő atomerőművekben a hő nem használható hidrogén-előállításra. Valószínűleg ez igaz, de egy kiskapu lehetséges, bár a technológia ott még messze van a piacérettégtől. Ez a biológiai alapú hidrogén-előállítás, melynél az erőművek szekunder vagy esetleg terciér hője (ez utóbbi az ún. hulladékhő) lenne hasznosítható, hogy a biológiai-biokémiai folyamathoz szükséges hőmérsékletet biztosítsa. Még nincs piacérett termék, sőt, egyelőre még ígéretesnek mondható technológia sem, de a kutatás intenzív, nem kizárt, hogy a közeljövőben ezen a területen áttörés történik. Ez esetben a jelenlegi erőművek jelentős része alkalmas lenne a biológiai alapú hidrogén-gyártásra.

### 2.2 A megtermelt villamosenergia hasznosítása

Az atomerőművek legtriviálisabb hasznosítása a hidrogén-előállításban a megtermelt villamosenergiával történő elektrolízis, amely esetén a keletkező hidrogén karbonmentesnek mondható (hiszen karbonmentesen megtermelt villamosenergiával állították elő), viszont nem megújuló alapú. Mindemellett várhatóan a következő egy, de maximum két évtizedben ez a módszer is elfogadható lesz.

Ennek a megoldásnak a kétségtelen hátránya (nem megújuló alapú) mellett van előnye is a megújuló (PV-vagy szél-alapú) villamosenergiából való előállításal összehasonlítva. Az egyik az, hogy a jelenlegi energiamixben sok kis-közepes PV- vagy szélerőmű van, amelyek gazdasági szempontból túl kicsik ahhoz, hogy helyben állítsák elő a hidrogént, viszont a hálózatra kötésük (amivel biztosítható lenne, hogy a megtermelt villamosenergia eljusson egy vagy több központi elektrolizátorhoz)

stabilitási problémákat okozhat. Természetesen építhetők megfelelően nagy PV-telepek is (házánkban is létezik 100MW csúcsteljesítményű), de ez esetben sem biztos, hogy a megtermelt hidrogén szállításához megfelelő infrastruktúra (pl. nagy tartálykocsik által is használható utak) áll a rendelkezésre; ez az atomerőművek esetében nem jelent problémát.

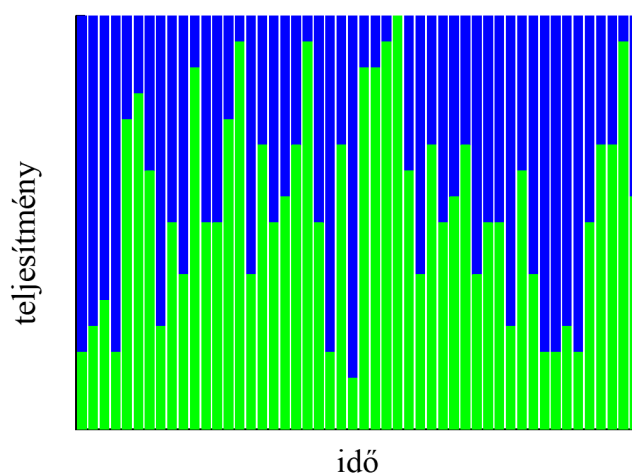
Egy másik előny, hogy a három, jelenleg dominánsnak tűnő elektrolízis-típus közül (alkáli, PEM, SOE [14]) egyedül a PEM az, amelyik képes a viszonylag gyors indításra-leállításra és elég jól tolerálja a gyorsan változó bemenő teljesítményt; amelyek olyan körülmények, amik egy PV-erőműnél gyakran előfordulnának. A másik két típus csak folyamatos üzemben tud jól termelni és mindkettőnek van előnye a PEM-mel szemben. Az alkáli elektrolízisnél ez egyértelműen az ár, ami akár fele-harmada is lehet az ugyanakkora bemenő teljesítményű PEM egységeknél. Természetesen ezt árnyalja az alkáli elektrolízis alacsonyabb hatásfoka, de sok esetben így is alacsonyabbak lesznek a fajlagos költségek. A SOE, vagy Solid Oxid Electrolyzer típus esetében a hatásfok szignifikánsan magasabb, mint a PEM technológia esetében, de egyelőre a magas árak akadályozzák a berendezések elterjedését. Itt még kiemelő, hogy ennél a típusnál a működéshez szükséges magas hőmérséklet esetleg szintén biztosítható lenne a primer-köri hő megcsapolásával. Sajnos – mint már említettük – ha az elektrolízis nukleáris alapú villamosenergiával használnák, az nem számítana megújulónak és egy-két évtizeden belül várhatóan az így előállított hidrogén sem számítana zöldnek.

A termikus bontással ellentétben elektrolízisnél a vízbontás termékei (a hidrogén és az oxigén) térben elkülönülve keletkeznek, így ez az előállítási módszer ebből a szempontból biztonságosabbnak tűnik.

### 2.3 A fény az alagút végén....

Az eddigiek alapján a jelenlegi atomerőműveknek nem sok szerep juthat a hidrogén-termelésben (főként nem a közeljövőben), de van egy terület, ahol mégis fontos szerepe lehet, az pedig a kombinált PV- és nukleáris alapú elektrolízis.

Az előző alfejezetben említettük az alkáli és SOE típusú elektrolízis berendezéseket, amikben olcsóbban vagy nagyobb hatásfokkal lehetne hidrogént előállítani, ha állandó bemenő teljesítményt tudnánk biztosítani. Tételezzük fel, hogy egy létező atomerőmű mellé építenek egy nagy teljesítményű PV-erőművet, amely nem termelne a hálózatra (már ez is pozitívum, hisz a hálózat egyre kevésbé tudja kezelni ezeket a termelőket), hanem csak hidrogén-előállításra használnánk a megtermelt áramot. Sajnos az előállított teljesítmény nagyon ingadozó, mint az 1. ábrán is látható; ez nem lehet közvetlenül az elektrolízisre. Természetesen megfelelő mennyiségű akkumulátor közbeiktatásával az ingadozások kisímithatók, de ez többlet-beruházást (akkumulátorok), valamint veszteséget (akkumulátorokon fellépő tárolási veszteség, típusától függően 2-15%) jelent. Itt lehet a megoldás a kerítés másik oldalán álló atomerőmű, amely az ingadozó



1. ábra: Változó kapacitású PV-alapú termelés (zöld) kiegészítése nukleáris alapú villamosenergiával (kék), állandó bemeneti teljesítmény biztosításához vízbontó berendezéseknél (sematikus ábra)

PV-teljesítményt kipótolva állandó bemenő teljesítményt tudna biztosítani az elektrolízis berendezéseknek.

Az így létrejött rendszernek két előnye lenne:

- Részben (esetenként jelentős részben) megújuló forrásokból származó, teljes egészében karbonmentes villamosenergiából állítanak elő a hidrogént.
- Olcsóbban (alkáli elektrolízis berendezések) vagy magasabb hatásfokkal (SOE), azaz alacsonyabb fajlagos költséggel, kiszámíthatóbb tömegárammal állítana elő hidrogént.

Ez a megoldás már létező erőműveknél is implementálható; extra költségei szinte nem is lennének, így megfelelő PV-parkokkal rendelkező atomerőműveknél akár már hónapokon belül beindulhatna az ilyen típusú termelés. A PV-parkokkal nem rendelkező atomerőműveknél jobbra van megfelelő szabad hely a napelemek kihelyezéséhez, így ez a megoldás általánosan is jónak mondható.

### 3. A távolabbi jövő

Az elektrolízisnek megvannak a saját problémái, így hosszú távon lehetséges, hogy nem ez lesz az ipari méretű hidrogén-előállításra a legjobb módszer. A problémák között megemlíthető, hogy a felhasználandó víz speciális tisztítást igényel, az elektrolízis berendezésekben levő katalizátorok anyaga (jelenleg ezek általában drágák és nagy mennyiségben nehezen hozzáférhetőek), valamint az is, hogy az elektrolízis – mint technológia – jóval több vizet használ, mint maga az elbontott mennyiség, így vízben szegény területeken problémássá válhat az alkalmazása. Ez utóbbi területen egyes országokban megoldást jelenthetnek a jelenleg intenzíven kutatott, tengervíz használatos technológiák.

A fenti problémák nem jelentkeznek a víz termikus bontásánál, így hosszú távon ebben a módszerben is sok lehetőség van, ezért előfordulhat, hogy a jövőben megjelennek olyan reaktorok, amelyek fő célja az ipari méretű vízbontáshoz szükséges magas hőmérsékletű és nagy fluxusú hő előállítása.



## Rövidítésjegyzék

SOE	szilárd oxid elektrolizátor
PV	fotovoltaikus
PEM	polimer elektrolit membrán (elektrolizátor)

## Irodalomjegyzék

- [1] A hidrogén lehet a klímaseglegesség kulcsa – interjú Lepsényi Istvánnal, a Magyar Hidrogéntechológiai Szövetség elnökével. Szerző: Horváth Dániel, Innotéka, 2022 május, pp27-31.
- [2] IEA Reports – The Future of Hydrogen (2019) <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [3] WEC Report – International Hydrogen Strategies (2020) <https://www.weltenergieerat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/?cn-reloaded=1>
- [4] Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája (2021) <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>
- [5] Sterner, M.; Stadler, I. Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; ISBN 978-3-662-55503-3.
- [6] Abdalla M. Abdalla, Shahzad Hossain, Ozzan B. Nisfindy, Atia T. Azad, Mohamed Dawood, Abul K. Azad: Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review, Energy Conversion and Management, (2018), vol. 165, pp. 602-627.
- [7] Kummer Kristóf, Attila R. Imre. 2021. "Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology" Energies 14, no. 11: 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>
- [8] Csedő Zoltán, Sinóros-Szabó Botond, Zavarkó Máté: Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology, Energies, 13 : 18 p. 4973 (2020) <https://doi.org/10.3390/en13184973>
- [9] Jussi Ikäheimo, Juha Kiviluoma, Robert Weiss, Hannele Holttinen: Power-to-ammonia in future North European 100 % renewable power and heat system, International Journal of Hydrogen Energy, (2018) vol. 43, pp. 17295-17308, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.121>
- [10] Pavlos Nikolaidis, Andreas Poullikkas: A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 597–611, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [11] Younas, Muhammad; Shafique, Sumeer; Hafeez, Ainy; Javed, Fahad; Rehman, Fahad: An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges, Fuel, (2022) vol. 316, No. 123317, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>
- [12] J. Lédé, F.Lapicque, J.Villermaux: Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water, International Journal of Hydrogen Energy (1983) vol. 8, pp.675-679
- [13] Marek Jaszczur, Marc A. Rosen, Tomasz Sliwa, Michał Dudek, Ludwik Pienkowski: Hydrogen production using high temperature nuclear reactors: Efficiency analysis of a combined cycle, International Journal of Hydrogen Energy (2016) vol. 41, pp7861-7871
- [14] Gerse Károly: Energiatárolók, Akadémiai Kiadó (2020) ISBN: 978 963 454 493 7, DOI: 10.1556/9789634544937

Making our world more productive



## A legmodernebb H<sub>2</sub> technológia a Lindétől

Megoldások a termeléstől az üzemanyagellátásig

Mint a teljes hidrogéntechológiai know-how-val rendelkező vállalat, biztosítjuk, hogy partnereink zéró emisszióval mozoghassanak.

Innovatív megoldásaink a hidrogén üzemanyag-technológia teljes skáláját lefedik – a gyártástól kezdve a H<sub>2</sub>-adagolókon át a H<sub>2</sub>-töltőállomásokig, az infrastruktúra kiterjed a buszparkok ellátásától, az anyagmozgatáson keresztül, az autók üzemanyagellátásáig.

Szolgáltatásaink széles skáláját a teljes hidrogén értéklánccal is kiegészítjük.

Zéró károsanyag kibocsátás a Linde által.

[www.lindegas.hu](http://www.lindegas.hu)