

Hidrogén előállításának lehetőségei

Possibilities of hydrogen production

BÖLKÉNY Ildikó¹, VADÁSZI Marianna PhD²

¹tud. s. munkatárs, ²egyetemi docens

Miskolci Egyetem – ¹Elektronikai és Informatikai Kutatóintézet, ²Kőolaj- és Földgáz Intézet
H-3515 Miskolc-Egyetemváros, Magyarország; ¹bolkeny@eiki.hu, ²vadaszi.marianna@uni-
miskolc.hu; ¹http://www.eiki.hu/, ²http://www.kfgi.uni-miskolc.hu/

ABSTRACT

In the 16th century, Turquet De Mayerne was the first to describe the formation of hydrogen. Then not long after, in 1671, Robert Boyle reported independently of him. Finally, in 1776, Henry Cavendish discovered it as a stand-alone element. [1] Its name is derived from the Greek word hydrogen, which means aquifer. Hydrogen is the lightest element, it has a high calorific value and a high heat of combustion, it is flammable and explosive in a wide concentration range, and it is a rapidly diffusing, mixing gas. [2] Although one of the most common elements in the universe, it is not free on Earth, it occurs only in its compounds in enormous quantities. It can be produced from hydrogen compounds by various processes using energy. The article presents some possibilities of hydrogen production, without claiming to be exhaustive.

KIVONAT

A XVII. században elsőként Turquet De Mayerne írta le a hidrogén keletkezését. Majd nem sokkal később, 1671-ben tőle függetlenül Robert Boyle is beszámolt róla. Végül 1776-ban Henry Cavendish felfedezte, hogy önálló elem. [1] Nevét a görög hidrogénium szóból származtatjuk, amely jelentése vízátkötő. A hidrogén a legkönnyebb elem, fűtőértéke, égéshője nagy, széles koncentrációs tartományban éghető és robbanóképes, továbbá gyorsan diffundáló, keveredő gáz. [2] Ugyan a világegyetem egyik leggyakoribb eleme, de a Földön szabadon nem, csak vegyületeiben fordul elő hatalmas mennyiségben. A hidrogén vegyületeiből előállítható, különböző eljárásokkal, energia felhasználásával. A cikk a hidrogén előállítás egyes lehetőségeit mutatja be, a teljesség igénye nélkül.

Kulcsszavak: hidrogénelőállítás, gőzreformálás, parciális oxidáció, autotermikus reformálás, elektrolízis

1. BEVEZETÉS

Az energia az emberiség egyik legfontosabb kérdése. A növekvő energiaigény, a regionális korlátozások és a hagyományos energiaforrások súlyos környezeti hatásai szükségessé tették új, tiszta és fenntartható energia igényét. A hidrogén egyre nagyobb figyelmet szentel mind a szállítás, mind az ipari energiaellátás területén. Az üzemanyagcella-meghajtású autók az utakon vannak, és az autóipar megvalósítható és hatékony technológiákat igényel a hidrogén előállításához. A hidrogént tiszta és hatékony üzemanyagnak tekintik a jövőbeli energiatermeléshez, nagy számú kutatást folytatnak a hidrogénüzemanyag előállításának, tárolásának és felhasználásának tanulmányozására.

Annak ellenére, hogy a hidrogén a legelterjedtebb elem a földön, tiszta formájában ritkán fordul elő. Ez a tény azt jelenti, hogy a hidrogén előállítása vegyületeiből történik. Természetesen ehhez az extrakciós folyamathoz energiára van szükség, azonban a hidrogént szinte bármilyen primer energiaforrásból ki lehet nyerni. A felhasznált erőforrások közé soroljuk a fosszilis tüzelőanyagokat (földgáz, szén), biomasszát, nem élelmiszeripari növényeket, nukleáris energiát, valamint a víz elektrolízisére szolgáló megújuló energiaforrásokat, mint például a szél, napenergia.

A lehetséges energiaforrások ilyen sokfélesége a legfontosabb oka annak, hogy a hidrogén ígéretes energiahordozó. Bár manapság a világ hidrogéntermelésének nagy részét a magas szén-dioxid

kibocsátással járó gőzreformálás adja, a technológiai fejlesztéseknek köszönhetően a hidrogént megújuló villamos energia felhasználásával is előállíthatják, ami „zöld” vagy karbonsemleges hidrogén előállításához vezet.

A hidrogénnek az 1960-as évek úrkutatási programja adott lendületet, ahol mint energiatároló töltött be fontos szerepet. Később az 1970-es évek energia- és olajválságának következményeként az alternatív energiakoncepciók új generációjának kutatása kezdődött meg. Az 1990-es évek alacsony energia ára, és az új energiaforrások iránti érdeklődés lanygulása ellenére a fenntarthatósággal, az éghajlatvédelemmel és a környezetvédelemmel kapcsolatos kérdések egyre nagyobb hatást gyakoroltak az energiaellátási politikára. Ez a hidrogén iránt új érdeklődést váltott ki, mint tiszta és fenntartható energia.

Az elmúlt két évtizedben az energiaügyi vitát más energiaforrások - például a földgáz, a bioüzemanyagok / biomassa és a villamos energia - dominálták és továbbra is uralják. Ezen időszak alatt azonban folytatódott a hidrogénnel kapcsolatos technológiák intenzív kutatása és fejlesztése.

A hidrogén biztonságos és költséghatékony előállításának különféle módjai vannak. A cikk a fosszilis és a nem fosszilis tüzelőanyagok hidrogén előállítási technológiáit tekinti át, részletezi a gőzreformálás, a parciális oxidáció, az autotermikus reformálás és a vízbontás alapjait, mechanizmusait. A vízelektrolízis megújuló energiával történő kombinálásával környezetbarát technológiát kapunk.

2. FOSSZILIS TÜZELŐANYAGBÓL ELŐÁLLÍTOTT HIDROGÉN ELJÁRÁSAI

Jelenleg a hidrogén-üzemanyag előállítás 95%-a származik a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagokból, a gőz-reformáló, elgázosítási és részleges oxidációs technológiákból. Ezeknek a technológiáknak különféle kihívásai vannak, mint például a teljes energiafogyasztás és a környezetbe jutó szén-dioxid-kibocsátás továbbra is magas értéke.

A fosszilis szénhidrogének reformálása messze a legelterjedtebb módszer a hidrogéntermelés számára. A gőzreformálás érett technológia, hidrogén tartalmú szintézisgázok előállítására régóta ismert, azonban a nagytisztaságú hidrogén gyártására csak a közelmúltban terjedt el. A reformálás során a szénhidrogéneket és az alkoholokat kémiai folyamatokkal hidrogénné alakítják, miközben víz (gőz), szén-monoxid és szén-dioxid keletkezik melléktermékként. A hidrogén gőzreformálással történő előállításához további, nem újra hasznosítható nyersanyagok is használatosak, úgymint a metanol, a cseppfolyósított propán és bután, benzín, és dízel.

A reakció magas hőmérsékleten (700 °C és 900 °C között) megy végbe, az átalakítást katalizátor segíti. A katalizátor kokszolással történő aktiválása, valamint a kén jelenléte jelentősen csökkentheti a hidrogéntermelést a gőzreformáló folyamatokban. Vizsgálatokkal igazolták, hogy a feldolgozó reaktorokban az üzemeltetési feltételek, például hőmérséklet, nyomás stb. javításával maximalizálják a hidrogéntermelést és minimalizálják a karbon kibocsátást. [3], [4]

A nyersanyag mellett a reformálás oxidálószer is igényel. Az alkalmazott oxidálószer alapján az alábbi módszereket fejlesztették ki:

- Gőz-reformálás: oxidálószerként tiszta vízgőzt használnak. A reakció megköveteli a hő bevezetését, a lejátszódó folyamat endoterm.
- Parciális oxidáció: az alkalmazott oxidálószer oxigén vagy levegő, a folyamat exoterm, hőt bocsát ki.
- Autotermikus reformálás: a technológia a gőzreformálás és részleges oxidációs kombinációját alkalmazza, levegő és vízgőz keverékével működik. A két oxidálószer arányát úgy állítják be, hogy hő bevezetésére, illetve kibocsátására ne kerüljön sor. [5]

Mivel a gőz reformálása összetett folyamat, amit a nagy fázisok száma is alátámaszt, alacsony energiahatékonyság, termodinamikai korlátok is indokolják a folyamatos innovációt az új eljárások kidolgozásában. [6]

Technológia	Előnyök	Hátrányok
Gőz-reformálás	Legelterjedtebb technológia, oxigént nem igényel Legalacsonyabb üzemi hőmérséklet Legjobb H ₂ /CO arány	Legnagyobb levegő kibocsátás
Autotermikus reformálás	Alacsonyabb üzemi hőmérséklet mint a parciális oxidáció esetén Alacsony metán veszteség	Korlátozott kereskedelmi tapasztalat Levegőt vagy oxigént igényel
Parciális oxidáció (POX)	Kénmentesítési igény kisebb Katalizátort nem igényel Alacsony metán veszteség	Alacsony H ₂ /CO arány Nagyon magas üzemi hőmérséklet Koromképződés, kezelése bonyolultabbá teszi a folyamatot

2.1. A földgáz gőzreformálás

A földgáz gőzreformálásával jelenleg a világ hidrogéntermelésének 48% -át állítják elő. A kutakból származó földgáz kezelése után főleg egy kémiai vegyületet, metánt tartalmaz. A következő részarányok a földgáz egy tipikus összetételét mutatják térfogatszázalékban kifejezve, CH₄: 95%, C₂+: 3,5%, N₂: 1%, CO₂: 0,5%, továbbá kis mennyiségű kénvegyületek. A földgáz gőzreformálás fő reakciói a következők:

1. Alapanyag kéntelenítése: A gőzreformálás során alkalmazott Ni katalizátor a néhány tized ppm kéntartalomra is rendkívül érzékeny. Ezért kiemelkedően fontos a földgázban lévő szennyező komponensek eltávolítása. A főként metánból álló földgázt komprimálják, előmelegítik, majd hidrogénezéssel a kénvegyületeket hidrogén szulfidra alakítják. A folyamatban leginkább az aktív szén adszorpciót, illetve a ZnO-al történő reakciót alkalmazzák. [18]

2. Első- és másodlagos reformálás: A szénhidrogén alapanyag gőzreformálása két katalitikus lépcsőben történik. Az első lépésben gőz jelenlétében az elsődleges reformálás folyamata játszódik le, amely során részlegesen átalakított termék keletkezik. Katalizátorként alumínium hordozóra felvitt Ni katalizátort alkalmaznak, mely hatékonysága Na₂O és K₂O adalékokkal növelhető (0,2-0,5ppm minimális kéntartalomra tervezve). A reakció gyorsításához a gőz-reformálás során alkalmazott magas hőmérsékletek (800-900 °C) ellenére a metán nagy stabilitása miatt katalizátorra továbbra is szükség van. A reformáló reakció előtt a katalizátort aktiválni kell, a nikkelt-oxidot fémes nikkelle redukálva. A katalizátorral szemben támasztott követelmény az alacsony nyomásesés és az 1000 °C-ig történő magas mechanikai ellenállás. A reformátor célja az üzemanyag-felhasználás optimalizálása, a reformálás maximális mértékének elérése és ennek következtében magas hidrogén hozam, a WGS és a tisztító szakaszok után. A második lépés a teljes reformálás, ami alacsony metántartalmú terméket eredményez. Másodlagos reformáló: Hőálló nyomástartály, nagy termikus ellenállású alumínium hordozóra felvitt Ni katalizátor. [6]

3. CO átalakítás: A szén-oxidok eltávolítását magas hőmérsékleten, 350-400 °C-on végzik, ezt egy alacsonyabb, 200-250 °C -os átalakító eljárás követi. Ebben a szakaszban két WGS reaktor található. A magas hőmérsékleten történő átalakítás során a nagy szén-monoxid-tartalommal 350 °C-ra lehűtött gázt WGS-reakcióval vas-oxid-alapú katalizátorok segítségével hidrogénné alakítják. A katalizátorok általában 8-12 m/m% Cr₂O₃-t tartalmaznak. A reakció exoterm jellege miatt a kilépő gáz hőmérséklete 400-450 °C körül van, és az átalakítás befejezetlen. A kilépő gáz CO-tartalma körülbelül 3 térfogat %, ami közel áll az egyensúlyhoz. A gázt kb. 220 °C-ra hűtik, és az alacsony hőmérsékletű váltóreaktorba táplálják. Réz-cink vagy réz-cink-alumínium, katalizátorokat alkalmaznak. A kilépő gáz CO-tartalma körülbelül 0,05-0,5 térfogat %, ami 95-99% -os konverzióknak felel meg. A hőmérséklet fokozatosan emelkedik az átalakítón, és nem haladhatja meg a 260 °C-ot. Az alacsony hőmérsékletű váltóreaktor bemeneti gázában a H₂S-koncentráció nem érheti el 0,5 ppm-t

4. CO₂ eltávolítás: A CO átalakítóból kikerülő gázáramok CO₂ tartalma kb. 17-18 V/V%. A savas gáz leválasztására a leggyakrabban alkalmazott eljárás a mono-, di- és trietanolaminnal végzett abszorpció. Az amint 15-20 V/V%-os vizes oldat formájában adagolják a rendszerbe. [18]

5. Szintézisgáz tisztítás: A modern technológiai eljárásokban a szén-dioxid szennyezők eltávolítására metanációs eljárást alkalmaznak. Az eljárás katalizátora Al_2O_3 hordozóra felvitt Ni katalizátor. A hidrogén tisztítása két lehetséges módon történhet. Az első a nyomáslengetéses módszer (Pressure Swing Adsorption – PSA). A magas hőmérsékleten történő eltolódás után a gázt környezeti hőmérsékletre hűtik. A vizet kondenzálják és eltávolítják, mielőtt a gázt az adszorpciós lépéshez vezetik. A módszerrel elérhető hidrogéntermék tisztasága 99,999% -ig terjedhet.

2.2. Parciális oxidáció (POX)

A részleges oxidáció alatt elsősorban nehéz szénhidrogének (például nehéz fűtőolaj vagy szén) exoterm átalakulását értjük oxigén (O_2) segítségével. A reakció egyenlete, az alábbi formában írható fel: $\text{C}_n\text{H}_m + n/2 \text{O}_2 \rightarrow n \text{CO} + m/2 \text{H}_2$

A termikus részleges oxidációra nagy nyomáson és magas hőmérsékleten kerül sor, 1250 °C és 1400 °C között. A hő felszabadulása esetén nincs szükség külső hőforrásra, kivéve a nyersanyag részleges égését.

A gázolajban található hosszú láncú alkán, a hexadekán POX reakció egyenlete az alábbi formában írható fel: $\text{C}_{16}\text{H}_{34} + 8 \text{O}_2 \rightarrow 16 \text{CO} + 17 \text{H}_2$

A gőz-reformáló folyamattal összehasonlítva a POX eljárás hatékonysága alacsonyabb; a működtetési költség túl magas a tiszta oxigén nagy mennyiségének felhasználása miatt [10]

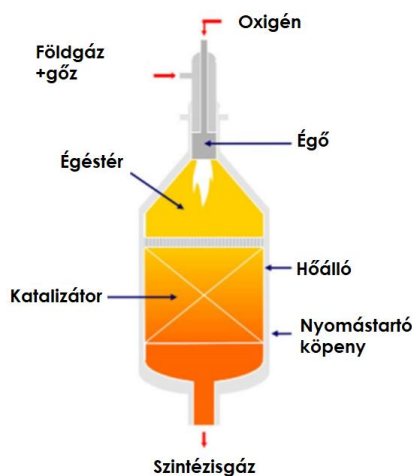
Ennél az eljárásnál minél hosszabb a felhasznált szénhidrogénlánc, annál alacsonyabb a hidrogén hozama. Lényeges különbség a gőzreformáláshoz képest, hogy oxidálószerként vízgőz helyett O_2 -t használnak. [11] Ezt az O_2 -t általában egy levegő leválasztó egységben állítják elő, ami jelentősen növeli a részleges oxidáció energiafogyasztását. A szénhidrogén katalitikus részleges oxidációjából származó hidrogéntermelést a kereskedelemben és a gépjármű-üzemanyagcellákban alkalmazzák. [12]

A POX reaktorok hatékonysága a metán magasabb fűtőértéke eredményeként 60% - 75%. [13] A parciális oxidáció technológiájáról összességében elmondható, kevésbé hatékony, mint a gőzreformálás; ugyanakkor azzal az előnnyel jár, hogy a nyersanyagok szélesebb skáláját képes átalakítani, ahelyett, hogy könnyű szénhidrogénekre támaszkodna.

2.3. Autotermikus reformálás (ATR)

Az autotermikus reformálás a gőz-reformálás és a részleges oxidáció kombinációja. A metán reformálására a következő reakció-egyenlet szerint kerül sor: $4\text{CH}_4 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CO} + 10\text{H}_2$

Az ATR-folyamatban a magas hidrogén hozamot a gőz-reformáló lépés határozza meg. Előnye, nem függ a külső hőellátástól, többé-kevésbé ellensúlyozza a légleválasztó egység megnövekedett beruházási és üzemeltetési költségeit és a bonyolultabb füstgáz tisztítási folyamatot. [5] A folyamat alacsonyabb nyomáson zajlik a POX-reformáló folyamathoz képest. A gőzreformáló reakciókhoz szükséges katalitikus zónában szükséges hő a POX eljárás alkalmazásával hozzák létre. [14]



Autotermikus reaktor felépítése [15]

Az 1. ábrán az autotermikus reaktor egységei láthatók. A POX-eljárással összehasonlítva, az autotermikus reakció jelentős előnye, nagy mennyiségű hidrogén-gázt állíthat elő, miközben az indulás és a leállítás nagyon gyors. A gőz/karbon arány és az oxigén/üzemanyag arány megválasztásával kell szabályozni a hőmérsékletet, valamint a kokszképződés megakadályozását. [16]

3. HIDROGÉN ELŐÁLLÍTÁSA ELEKTROLÍZISSEL

A hidrogén előállítható a víz elektrolízise útján. A vízbontását az 1800-as években mutatta be először Nicholson és Carlisle. Az ő megfontolásukat tovább vitte August Wilhelm von Hoffman német kémikus és megalkotta a Hoffman-féle vízbontó készüléket, amelyet a mai napig használnak az iskolákban személtető eszközként, amelyet a 2. ábrán láthatunk. Ez a készülék egy háromágú közlekedőedény, amely műanyag talpazaton rögzül. A középső csőbe sósavval vagy kénsavval savanyított víz, a másik két cső alján pedig egy-egy elektród van elhelyezve. Az elektródokhoz áramforrást csatlakoztatunk. Ekkor a katódon H_2 gáz, míg az anódon O_2 gáz képződik. [13]



2. ábra

Hoffman-féle vízbontó készülék [17]

Vagyis az elektrolízis folyamata a vizet elektromos áram felhasználásával hidrogénné és oxigénné bontja le. Az elektrolízishez használt elektrolizátor egy DC forrásból és két nemesfémmelel bevont elektródból áll, amelyeket egy elektrolit választ el egymástól. Az elektrolit vagy ionvezető folyadék lehet, például vezetőképessé maró-kálium-oldat (KOH) az alkalikus elektrolízishez. Egy alkáli elektrolizátorban a katód elveszíti az elektronokat a vizes oldathoz. A víz disszociál, ami hidrogén (H_2) és hidroxid-ionok (OH^-) képződéséhez vezet.

A töltéshordozók az elektrolitban az anód felé mozognak. Az anódnál az elektronokat a negatív OH^- anionok abszorbeálják. Az OH^- anionok oxidálódnak, hogy vizet és oxigént képezzenek. Az oxigén mennyisége nő az anódnál. A membrán megakadályozza a H_2 és O_2 termékgázok keveredését, de lehetővé teszi az OH^- ionok átjutását. Az elektrolizátorok különálló cellákból és központi rendszer egységekből állnak. [18]

Az elektrolizátorokat megkülönböztetik az elektrolit anyagok és a működési hőmérséklet alapján, így különböző elektrolízisekről beszélhetünk az alábbiak szerint:

- alacsony hőmérsékleten végzett elektrolízis (LTE)
- alkáli elektrolízis (AE)
- protoncserélő membrán elektrolízis (PEM)
- elektrolízist és az anioncserélő membrán elektrolízis (AEM) elektrolízist
- magas hőmérsékleten végzett elektrolízis (HTE)

A hidrogén olyan, mint a villamos energia abban az értelemben, hogy használata nem generál kibocsátást. Szén-dioxid-lábnyoma az előállítási módhoz kapcsolódik. Az elektrolízissel előállított hidrogén esetében a hidrogén karbon lábnyoma közvetlenül kapcsolódik az áramforráshoz. A megújuló vagy nukleáris villamos energiából előállított hidrogén ezért szénmentes. A rácskeveréssel előállított hidrogén szén-intenzitása ugyanolyan, mint a rácskeveréknél.

4. ÖSSZEGZÉS

A beszámolóban a hidrogéntermelés kulcsfontosságú technológiáit, mind a fosszilis, mind a nem fosszilis tüzelőanyagokon alapuló módszerek kerültek bemutatásra a teljesség igénye nélkül. Bár napjainkban a hidrogén 95%-a fosszilis tüzelőanyagból kerül előállításra, a jövőben a megújuló energia gazdaságosságának növekedésével ez valószínűsíthetően csökkenni fog.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Miskolci Egyetem „Felszín alatti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása” című projektjének részeként, az Innovációs és Technológiai Minisztérium támogatásával zajló Tématerületi Kiválósági Program keretében valósult meg. (Támogatói Okirat ikt. szám: NKFIH-846-8/2019)

IRODALOM

- SCHILLER, Róbert 2013: Hidrogén, az elemek királya, Typotex, Budapest, ISBN 978 963 279 316 0
- HAMPEL C.A.:(Ed) 1968: The Encyclopedia of the Chemical Elements, Reinhold Book Corporation, New York
- KING, D.L., BROOKS, K.P., FISCHER, C.M., PEDERSON, L., RAWLINGS, G., STENKAMP, S.V., TEGROTHUIS, W., WEGENG, R. AND WHYATT, G.A. 2005: Fuel Reformation: Catalyst Requirements in Microchannel Architectures. *Microreactor Technology and Process Intensification*, 119-128, Washington DC
- ROSTRUP-NIELSEN, J. 2003: Hydrogen Generation by Catalysis, *Encyclopedia of Catalysis*, Wiley Interscience,
- Adolf J., Balzer C. H., Louis J., Schabla U., Fishedick M., Arnold K., Pastowski A., Schüwer D., 2017: Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂, Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg, <https://www.shell.de/>
- GARCÍA L., 2015: Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain
- WILHELM, D.J., SIMBECK, D.R., KARP, A.D. AND DICKENSON, R.L. 2001: Syngas Production for Gas-to-Liquids Applications: Technologies, Issues and Outlook. *Fuel Processing Technology*, 71, 139-148.
- HOLLADAY, J., JONES, E., PALO, D.R., PHELPS, M., CHIN, Y.-H., DAGLE, R., HU, J., WANG Y. AND BAKER, E. 2003: Miniature Fuel Processors for Portable Fuel Cell Power Supplies. In: *Proceedings of the Materials Research Society Symposium*, Materials Research Society, 429-434. Boston, MA
- NAVARRO R.M., PEN M.A., FIERRO J.L.G., 2007: Hydrogen Production Reactions from Carbon Feedstocks: Fossil Fuels and Biomass. *Chemical Reviews* 3952-91. <https://doi.org/10.1021/cr0501994>
- ANGELI, S.D., MONTELEONE, G., GIACONIA, A. AND LEMONIDOU, A.A. 2014: State-of- the-Art Catalysts for CH₄ Steam Reforming at Low Temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 1979-1997. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.001>
- CZERNIKOWSKI, A. 2001: Glidarc Assisted Preparation of the Synthesis Gas from Natural Gas and Waste Hydrocarbons Gases. *Oil & Gas Science and Technology — Rev. IFP*, 2, 181-198. <https://doi.org/10.2516/ogst:2001018>
- TIMM, D.L. AND ONSAN, Z.I. 2001: On Board Fuel Conversion for Hydrogen-Fuel- Cell-Driven Vehicles. *Catalysis Review*, 43, 31-84. <https://doi.org/10.1081/CR-100104386>
- MCHUGH, K. 2005: Hydrogen Production Methods. MPR Associates Inc., 41
- KRUMPELT, M., KRAUSE, T.R., CARTER, J.D., KOPASZ, J.P. AND AHMED, S. 2002: Fuel Processing for Fuel Cell Systems in Transportation and Portable Power Applications. *Catalysis Today*, 77, 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00230-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00230-4)
- MUHAMMAD H. R. 2011: Experimental Studies and Modeling of Synthesis Gas Production and Fischer-Tropsch Synthesis. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
- BELLOWS, R.J. 1999: Technical Challenges for Hydrocarbon Fuel Reforming. DOE, Baltimore, MD.
- JAKUS A. 2015: Hoffman-féle vízbontó készülék, <https://hetikiserlet.blog.hu/>
- EL_SHAFIE M. I., KAMBARA S., HAYAKAWA Y., 2019: Hydrogen Production Technologies Overview, *Journal of Power and Energy Engineering* 7 107-154.