

**Energetika II.**

BMEGEENAEE4

**A nukleáris energia szerepe a hidrogéntermelésben**

Papp Dániel Gábor

2012.04.25 …..…………………………

 Dátum Aláírás

**Bevezető**

A világ energiaipara átalakulás előtt áll. Mind a fogyatkozó fosszilis energiahordozóktól való függetlenedés mind pedig az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése komoly feladat elé állítja az iparágat. Ezen problémák megoldásának érdekében változtatásokat kell eszközölnünk az energiafelhasználási szokásainkban és energiamixünk kialakításában továbbá új technológiák bevezetésére is szükségünk lesz.

 Sok vélemény szerint az egyik megoldás a hidrogéngazdaság lehet, mely választ nyújthatna a fenti problémákra. A hidrogénre sokkal inkább az elektromos áramhoz hasonló energiahordozóként tekinthetünk mintsem a fosszilis üzemanyagokkal egyenértékű energiaforrásra. A jövőben komoly szerep juthat neki a közlekedésben (üzemanyagcellás járművek) valamint az elektromosenergia-termelésben (Hydrogen intermediate and peak electricity system (HIPES)) [3]. Ezen túl már ma is nagy mennyiségben használják az iparban elsősorban az ammóniagyártásban mely a világ hidrogén felhasználásának feléért felelős. [4]

 A hidrogéntermelési módoknál négy fő szempontot kell figyelembe vennünk a termeléshez szükséges földterületet, a primer energiahordozó rendelkezésre állását, a CO2 kibocsátást és természetesen a költségeket. Ma a világ hidrogén előállításának 96%-a fosszilis energiahordozókból történik, elsősorban metánból és kőszénből. [2,4]. Ezen technológiák bár gazdaságosak közel sem felelnek meg a környezetvédelmi szempontoknak. A különböző biológiai eljárások (algatelepek) és biomasszából történő előállítás mellett versenyképes lehet a nukleáris energia közreműködésével végzett termelés is, ugyanis ezekkel a módszerekkel is el lehet érni 2$/kg körüli árat. Ez a versenyképesség különösen igaz a szél és napenergiát használó megoldások esetében elérhető árra [5] nem is beszélve ezek kis energiasűrűségéből fakadó óriási területigényükről. A nukleáris energiát alkalmazó módszernél a legtöbb esetben vizet használnának alapanyagként mely hosszú távon előnyösebb és gazdaságosabb lehet, mint a jelenleg használt alternatívák.

**Nukleáris energiát használó hidrogéntermelési eljárások**

A potenciális technológiák három fő csoportba sorolhatóak melyek a következők: termokémiai eljárások, elektrokémiai eljárások valamint e két módszer kombinálásával végrehajtott hibrid eljárások.

 Az eljárások hatásfokát mindhárom esetben a hidrogén fűtőértéke és a befektetett hő és villamos energia hányadosakén értelmezzük.

$η=\frac{H}{Q+\frac{W\_{E}}{η\_{E}}}$ [4]

 Az egyenletből látható, hogy fontos szerepet játszik a felhasznált villamosenergia-termelésének hatásfoka is erre a későbbiekben térek ki.

* *Termokémiai eljárások*

Ebben a kategóriába magas hőmérsékleten akár 900°C-on lejátszódó kémiai reakciók szerepelnek. Megjegyzendő, hogy ide tartozna a víz 4400°C-on történő disszociációja is azonban ez az óriási hőmérséklet miatt nem járható út. [4] A gőz metán reformálást kivéve az összes módszernél a vízen, hidrogénen és oxigénen kívül az összes anyag csak katalizátorként szerepel, így nem kerülnek kibocsátásra a környezetbe.

* *Gőz metán reformálás*

A jelenleg leginkább elterjedt eljárás melynél kiindulási anyagként és a szükséges hőmérséklet biztosításához is földgázt használnak ez tehát nem karbonmentes eljárás azonban utóbbi kiváltható nukleáris hőforrással így téve környezetbarátabbá az eljárást. A folyamat a következő:

CH4 + H2O → CO + 3H2 (750-800°C)

CO + H2O → CO2 + H2 (350°C)

A közeljövőben párosítva egy magas hőmérsékletű héliumhűtésű reaktorral (HTGR) ez terjedhet el leginkább tekintve, hogy ez már ma is egy kiforrott technológia és, hogy akár 60%-os hatásfok is elérhető vele. [1]

* *Kén-jód ciklus*

A folyamatot először a General Atomics vizsgálta az 1970-es években. Három szakaszban megy végbe, először az úgynevezett Bunsen szakaszban víz reagál jóddal és kén-dioxiddal melynek során kénsav és hidrogén-jodid keletkezik, melyek később szétválnak oxigénre, kén-dioxidra és vízre valamint hidrogénre és jódra.

I2 + SO2 + 2H2O → 2HI + H2SO4 (120°C)

H2SO4 → SO2 + H2O + ½ O2 (830-900°C)

2HI → I2 + H2 (300-450°C)

 A folyamatban résztvevő kénsav és hidrogén jodid erősen korrozív vegyületek így a szerkezeti anyagok megválasztásánál ezt mindenképpen figyelembe kell venni. [1] Párosítva egy HTGR-rel vagy egy speciális magas hőmérsékletű reaktorral (AHTR) 35-45%-os hatásfok is elérhető, amely a hőmérséklet függvénye, azaz a hőveszteségek csökkentésével növelhető a hatásfok. [4]

* *UT-3 ciklus*

Nevét a kifejlesztés helyéről (University of Tokyo) valamin a reakciókban szerepet játszó három elemről (Ca-Br-Fe) kapta. [1]

CaBr2 + H2O → CaO + 2HBr (730°C)

CaO + Br2 → CaBr2 + ½ O2  (550°C)

Fe3O4 + 8HBr → 3FeBr2 + 4H2O + Br(220°C)

3FeBr2 + 4H2O → Fe3O4 + 6HBr + H2 (650°C)

HTGR reaktorral való szereléssel a 80-as 90-es években 49%-os hatásfokot állapítottak meg szimulációk alapján azonban újabb kutatások szerint ez csupán 13% ami túl alacsony ahhoz, hogy ez a módszer gazdaságos legyen. [4]

* *Cu-Cl ciklus*

A réz és klór jelenlétében lejátszódó folyamatsorozat során hidrogén és oxigén keletkezik végtermékként. [2] Legfőbb előnye, hogy a legmagasabb hőmérsékletigényű részfolyamat is végbemegy 500°C-on így jelenleg is létező reaktortípusokkal is párosítható például egy nátriumhűtésű gyorsreaktorral (SFR). Továbbá ezen a hőmérsékleten a korróziós folyamatok is jobban nyomonkövethetőek mint a korábbi esetekben. Hatásfoka 40-45% körülire tehető. A folyamat:

2Cu + 2HCl → 2CuCl + H2 (450°C)

4CuCl + 4Cl− → 4CuCl2-  (30°C)

4CuCl2- → 2CuCl2 + 2Cu + 4Cl− (30°C)

2CuCl2 → 2CuCl2 (100°C)

2CuCl2 + H2O →CuO + CuCl2 + 2HCl (400°C)

CuO + CuCl2 → 2CuCl + ½ O2  (500°C)

[4]

* *Elektrokémiai eljárások*

A víz elektrolízissel felbontható összetevőire ez egy bizonyított és jelenleg is használatos eljárás, ugyanakkor nagy az energiaigénye ennélfogva nagy léptékben nem kivitelezhető gazdaságosan. Jelenleg ezen a módon, a világon termelt hidrogén 4%-át állítják elő. [4]

* *Magas hőmérsékletű gőz elektrolízise*

Ha az elektrolízis magasabb hőmérsékleten végezzük azzal csökkenthető a szükséges elektromos energia mennyisége. A szükséges összes energia (ΔH) tehát áll a szükséges hő (Q) valamint elektromos energiából (Gibbs-féle szabadentalpia, ΔG). A hőmérséklet emelésével növelhető a hatásfok, bár ΔH nő, de ΔG részaránya és ennek folyományaként a villamosenergia-termelésből fakadó veszteségek egyre csökkennek (1. ábra).

 [1]

 Látható, hogy a módszer nagy hatásfokú villamosenergia-termelés esetén hatékony igazán. Az alkalmazott reaktorok skálája igen széles lehet sóolvadékos reaktor, folyékony ólom hűtésű reaktor, HTGR, szuperkritikus vízhűtésű reaktor gyakorlatilag az összes mely ki tudja szolgálni a módszer hőigényét valamint megvalósítható vele a nagy hatásfokú elektromosáram-termelés. Az USA-ban és Japánban folytatott kutatások alapján 43-48%-os hatásfokot várnak. [4]

* *Termokémiai hibrid eljárás*

A termokémiai hibrid eljárás vagy Westinghouse eljárás az elektrolízist és a termokémiai reakciókat kombinálja. Az elektrolízis segítségével a folyamat egyes részei alacsony hőmérsékleten is véghezvihetők. A két fő részfolyamat a következő először a víz és a kén-dioxid elektrolízisét végzik 80°C körüli hőmérsékleten majd az így keletkezett hidrogénből és kénsavból a kénsavat a kén-jód ciklusnál ismertetett módon visszaalakítják kén-dioxiddá, vízzé és oxigénné.

H2SO4 → SO2 + H2O + ½ O2  (800°C)

2H2O + SO2 → H2SO4 + H2 elektrolízis (80°C)

A kén dioxid jelenléte csökkenti az elektrolízishez szükséges feszültséget és ezáltal a szükséges energiát is továbbá abban a szakaszban, melyben a hidrogén előállítása történik nincs szükség magas hőmérsékletre ezért ez távol helyezhető a reaktorból, amely biztonsági szempontból lehet fontos. Az eljárás hatásfokát 49% körülire teszik. [1,4]

**Nukleáris technológiák hidrogéntermelésre**

A fenti eljárásoknál a két legfontosabb feltétel a megfelelő hőmérséklet valamint a nagy elektromosáram-termelési hatásfok melyek szükségesek a minél nagyobb hatásfok eléréséhez. A IV. generációs reaktorok különösen alkalmasak lehetnek a feladatra tekintve magas üzemi hőmérsékletüket. További szempontok lehetnek még a reaktorok inherens biztonsága, az inert hűtőközeg használata valamint a hő és nyomásveszteségek csökkentése.

* *Reaktortípusok*

Az alábbiakban néhány ígéretes reaktortípus bemutatása következik.

* *Magas hőmérsékletű héliumhűtésű reaktor*

Az angolul high temperature gas cooled reactor-nak (HTGR) nevezett típusból máig hét darabot létesítettek a világon. [4,6,7] Ebben a termikus reaktorban keramikus urán-dioxid üzemanyagot alkalmaznak grafit moderátorral. [4] A reaktorból kilépő hélium hűtőközeg hőmérséklete 850°C körüli, de jövőbeli fejlesztések során elérheti az akár 1000°C-os értéket is. Kén-jód ciklussal illetve Westinghouse eljárással ideális lehet hidrogéntermelésre. [1]

* *Speciális magas hőmérsékletű reaktor*

A szintén termikus reaktor típusból jelenleg még nem építettek egyet sem azonban remekül megfelel a hidrogéntermelés támasztotta elvárásoknak. A szintén uráni-dioxid üzemanyaggal működő grafit moderátoros koncepció hűtőközege olvadt fluorid só melynek hőmérséklete a reaktorból kilépve 1000°C valamint villamosenergia-termelő rendszerekkel is kombinálható. A reaktort nagy méretben (2000MWth) tervezik kivitelezni. [1]

* *Speciális gázhűtésű reaktor*

A jelenleg is üzemelő termikus reaktor leginkább az Egyesült Királyságban terjedt el. A HTGR-hez hasonlóan urán-dioxid üzemanyagot és grafit moderátort alkalmaz hűtőközege azonban hélium helyett szuperkritikus szén-dioxid, 650°C-on illetve 4,3 MPa-on üzemel. A jövőben azonban mind üzemi hőmérsékletét mind pedig az üzemi nyomását növelni kívánják, ekkor alkalmas lehet egy szuperkritikus CO2-t alkalmazó gázturbinás villamosenergia-termelő körfolyamat megvalósítására. [1]

* *Biztonságos szállítható autonóm reaktor*

Angol nevén secure transportable autonomus reactor (STAR-H2). A reaktor gyors neutronspektrummal üzemel ezért nincs szükség moderátorra, egyaránt alkalmas hidrogén és elektromosáram-termelésére is. A technológia az orosz tengeralattjárók reaktorain alapul. Hűtőközege természetes keringetésű folyékony ólom 800°C-os kilépési hőmérséklettel. A típust az UT-3 termokémiai ciklus energiaellátására kívánják alkalmazni. [1]

* *Nátriumhűtésű gyorsreaktor*

Ennek a IV. generációs reaktortípusnak ólomhűtésű társához hasonlóan megvan az az előnye, hogy a gyors neutronspektrum alkalmazása miatt képes hasznosítani a természetes uránt valamin a termikus erőművek kiégett fűtőelemeit is. A nátriumhűtésű gyorsreaktorokra találhatunk példát úgy Franciaországban, mint az USA-ban vagy Oroszországban. Viszonylag alacsony 500°C-os üzemelési hőmérséklete miatt a Cu-Cl ciklus energiaellátására lehet alkalmas. [1]

* *Gázhűtésű gyorsreaktor*

Az előző gyorsreaktorokhoz hasonlóan szintén képes zárt üzemanyagciklussal üzemelni. Természetes uránt használhat üzemanyagként valamint képes az aktinidák újrahasznosítására. Hűtőközege 850°C körüli hélium. [4]

* *Villamosenergia-termelő rendszerek*

Az alábbiakban két gázturbinás körfolyamatot mutatok be mely a fenti reaktorokkal szerelve alkalmas lehet a hidrogéntermeléshez szükséges elektromos áram előállítására.

* *Hélium munkaközegű gázturbinás körfolyamat*

A HTGR valamint a gyors neutronspektrummal üzemelő reaktorok képesek lehetnek egy Joule-Brayton körfolyamat közvetlen meghajtására hélium hűtőközegük segítségével. [1,4] A hélium nagy energiasűrűsége valamint a moderátor hiánya egy nagyon kompakt kialakításhoz vezet”. [4] A rendszer bruttó hatásfoka 900°C-os közeg mellett 48 %. [1]

* *Szuperkritikus CO2 munkaközegű gázturbinás körfolyamat*

A szén-dioxid munkaközegű Joule-Brayton körfolyamat előnye hogy alacsonyabb hőmérsékleten is el tudja érni a héliumos változat hatásfokát. Beszámoltak már 45%-os hatásfokról 550°C és 20 MPa kilépő közeg paraméterek mellett. Ígéretes, egyszerű, gazdaságos rendszer melyet azonban még nem valósítottak meg.

 Ezen opciók mellett a villamosenergia-termelés természetesen megvalósítható a ma elterjedt gőz körfolyamatok segítségével is.

**Konklúzió**

A nukleáris energiát felhasználó hidrogéntermelés egy szén-dioxid mentes alternatívát nyújthat a jövő energiaellátására. Ma az egyetlen létező ilyen módszer a hagyományos konvencionális elektrolízis atomerőművekből származó áram segítségével azonban ez nem egy gazdaságosan kivitelezhető módszer. A közeljövőben valószínűleg a gőz metán reformálás terjedhet el leghamarabb magas hőmérsékletű reaktorokkal párosítva tekintve hogy ez a technológia fosszilis tüzelőanyagokat alkalmazva már ma is elterjedt. A későbbiekben a Westinghouse és a gőz magas hőmérsékleten való elektrolízise tűnik a legígéretesebb módszernek. Megjegyzendő hogy a jövőben a reaktortechnológiák valamint a villamosenergia-termelés területén végzett kutatások tovább növelhetik a tárgyalt eljárások hatásfokát.

**Források**

[1] BilgeYildiz, Mujid S. Kazimi; *Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies*; International Journal of Hydrogen Energy; 2006 Január; (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905000583)

[2] G.F. Naterera, M. Fowlerb, J. Cottonc, K. Gabriela; *Synergistic roles of off-peak electrolysis and thermochemical production of hydrogen from nuclear energy in Canada;* International Journal of Hydrogen Energy; 2008 December; (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908011336)

[3] Charles W. Forsberg; *Sustainability by combining nuclear, fossil, and renewable energy sources*; Progress in Nuclear Energy; 2009 Január; (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197008000772)

[4] Rachael Elder, Ray Allen; *Nuclear heat for hydrogen production: Coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant*; Progress in Nuclear Energy; 2009 Április; (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197008001376)

[5] Jeffrey R. Bartels, Michael B. Pate, Norman K. Olson; *An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources*; International Journal of Hydrogen Energy; 2010 Augusztus; (http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910007317)

[6] IAEA; *Nuclear power reactors in the world Reference data series*; 2011

 (http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS2\_web.pdf)

[7] IAEA; *Research reactor database (RRDB)* (http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx?filter=0)