

RÉGI-ÚJ ÁRAMFORRÁSOK: A TÜZELŐANYAG-ELEMEK

Inzelt György
ELTE, Fizikai-Kémiai Tanszék

Az utóbbi időkben sok sajtóközlemény jelent meg a tüzelőanyag-elemekről. Hallunk ezekről az áramforrásokról a többi tájékoztató eszköz műsoraiban is. Más tudományos vagy alkalmazott kutatási eredményről jóval kevesebb információt tesznek közzé. Még a tüzelőanyag-elemek olyan testvéréről sem, mint az utóbbi hat évben egyre jobban terjedő Li-ion-elemek. 1997-ben még nem gyártottak Li-ion-elemt, 2003-ban pedig már több mint egymilliárd darabot állítottak elő. Ez tette lehetővé a még kisebb mobiltelefonok elterjedését. Ha megnézzük a legújabb típusokat, azokban biztosan egy kisméretű, prizmatikus Li-ion-elemt találunk. Ezek teljesen új elven működő galvánelemek, míg a tüzelőanyag-elemek 165 éves múltra tekintenek vissza. Miért ez a hirtelen nagy népszerűség? Nem csigázom tovább a tisztelt olvasó kíváncsiságát. Elárulom, hogy ezektől az áramforrásoktól várjuk energiaigényünk egy részének kielégítését, és ami ugyanilyen jelentőségű, a környezetünk szennyeződésének csökkenését. Persze van még egy összetevője a hatványozott érdeklődésnek: a pénz. Hihetetlen összegek áramlanak ezeknek a kutatásoknak és fejlesztéseknek a támogatására. Bár sokan és sokat dolgoztak a területen – majd látni fogjuk, hogy nem is eredménytelenül – az események igazán az utóbbi időkben gyorsultak fel.

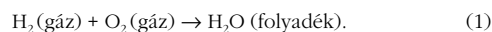
Keves az eszköz, technológia van, amely több oldalon keresztül szerepel a White House honlapján, és amelyről az Amerikai Egyesült Államok elnöke az Unió helyzetéről szóló, országértékelő beszédében hosszan beszél [1, 2]. Még fényképek is megjelennek *Bush elnök tüzelőanyag-cellákkal* címmel. Az USA kormánya már évtizedek óta nagy pénzeket fordított a kutatásokra, de Bush elnök 2003. január 28-i beszédében újabb, minden eddiginél nagyobb összeget, 1,2 milliárd dollár támogatást jelentett be. Az elnöki beszéd címe *Hidrogén tüzelőanyag: a jövő tiszta és biztonságos energiája*. Kifejtette, hogy a kulcsfontosságú kezdeményezéssel olyan technológiát fejlesztenének, amely megállítja a külföldi olajbehozattal való egyre növekvő függőséget. Az elérendő cél az, hogy hidrogén üzemanyaggal működő személy- és teherautók fussanak az utakon, és tüzelőanyag-cellákkal oldják meg a lakások és üzlethelyiségek energiaszükségletét csökkentve ezáltal a környezetszennyezést és az üvegházhatást okozó gázok mennyiségét is [3–5]. A számítások szerint, ha az USA-ban futó gépkocsik 10%-a használna tüzelőanyag-elemt, évente 60 millió tonnával lehetne a CO₂ és 1 millió tonnával a többi légszennyező kibocsátását csökkenteni. Az állami többletpénz „csak” 720 millió dollár az elkövetkező öt évben, mert a gépkocsik tüzelőanyag-celláira már vannak futó programok. Bush indította el a FreedomCAR programot 2002-ben, de ez tulajdonképpen korábbi projektek, például az USABC, PNVG folytatása [6–9]. Ezekben az állam és magánszektor 50–50%-ban osztozik a költségeken, 1991 óta az éves állami támogatás átlagosan 250 millió dollár (2004-re 273 millió \$) volt.

Nemcsak az Egyesült Államokban, hanem Európában, Japánban és a világ más országaiban is intenzív kutatás folyik. Érthető, hogy a nemes cél és annak anyagi ösztönzése megmozgatta az egyetemeket és a kutatóintézeteket. A vállalkozások is gombamód szaporodnak a „fuel cells” projektek területén. Számos olyan cég is beszállt az üzletbe, amelyek soha sem foglalkoztak ilyen kutatásokkal. Sajnos meg kell állapítanunk, hogy éppen ezektől származik a legtöbb „szenciació”, tudományos ismereteket igencsak fogyatékosan tartalmazó bejelentés, amelyek megjelennek a magyar ismeretterjesztés fórumain is. A várható profit is rendkívül vonzó. Míg a 2000. évben 218 millió USA dollárért tudtak a gyártók tüzelőanyag-elemeket értékesíteni, a 2004. évre várható bevétel 2,4 milliárd dollár (850 millió \$ erőmű, 750 millió \$ gépjármű, 800 mil-

lió \$ kisebb teljesítményigényű elektromos eszközök, katonai és űrkutatás), míg a jószolt szám 2009-re 7 milliárd dollár. Fejezzük be e rövid bevezetést azzal a számunkra is jelentős hírrrel, hogy az USA és az Európai Unió 2003. június 25-én egyezményt kötött arról, hogy tüzelőanyag-cellák fejlesztését közös ügynek tekintik és e területen együtt fognak működni.

Az alapreakció és a tüzelőanyag-elemek történetének főszereplői

Alessandro Volta (1745–1827) 1800-ban alkotta meg azt a készüléket, amelyik folyamatosan tudott elektromos áramot szolgáltatni. *William Nicholson* (1753–1815) és *Antony Carlisle* (1768–1840) még ugyanebben az évben a Volta-oszlop segítségével végrehajtották az első vízbon-tásos kísérletet [6, 10]. Az elektromos áram hatására vízből hidrogén és oxigén keletkezett. Ami számunkra érdekes, az a fordított folyamat, azaz a hidrogén és oxigén egyesítése víz:

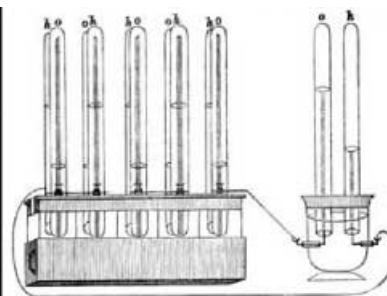


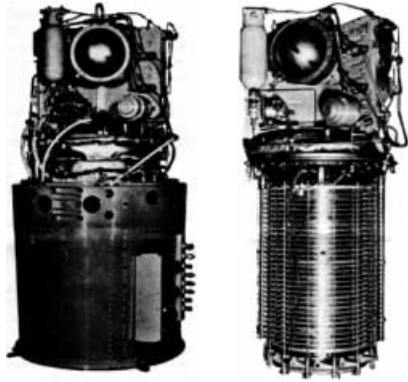
Ezt a reakciót durranógáz-reakciónak hívjuk, mert igen hevesen, nagy energiaszabadulással megy végbe. E folyamat reakcióhője, ha 25 °C-ra és 1 bar nyomásra adjuk meg, tehát a vízképződési reakció standard entalpiaváltozása, $\Delta H^\circ = -285,83 \text{ kJ mol}^{-1}$. Ez a reakció csak bizonyos H₂/O₂ arány (> 2) felett és 600 °C-nál nagyobb hőmérsékleten játszódik le. Platinakatalizátor jelenlétében a H₂ és az O₂ egyesülése robbanásszerűen megy végbe. Ugyanezt a reakciót galváncellában szobahőmérsékleten igen jó hatásfokkal tudjuk energiatermelésre felhasználni. Erre *William Robert Grove* (1811–1896) jött rá, akinek személyében a tüzelőanyag-elemek atyját tiszteljük (1. ábrán balra). 1838-ban vette észre azt, hogy ha vizet elektrolizál, az alkalmazott áram kikapcsolása után ellenkező irányú áram kezd el folyni [11]. Ezt az áramot az okozza, hogy az egyik platinaelektrodnál fejlődő hidrogén oxidálódik, míg a másikonál keletkező oxigén redukálódik. Grove kihasználta a felfedezését, és megszerkesztette az első tüzelőanyag-cellát, amelyet – megkülönböztetésül a többi elemtől, amelyekben fémek és vegyületeik közötti reakció szolgáltatja az áramot – gázelemnek nevezett el [12, 13]. A gázelem két, kénsavoldatba merülő platinaelektrodból állt. Az egyik elektród a hidrogén-, a másik az oxigéntartályba nyúlt be. Grove észrevette azt is, hogy az oldatok szintje emelkedik, amikor áram folyik a két elektród között. Ez jelezte a hidrogén, illetve az oxigén fogyását. A Grove-féle tüzelőanyag-elemt az 1. ábrán jobbra mutatjuk be.

Elektrolíziskor a fordított jelenség észlelhető, vagyis a fejlődő hidrogén (h) a katódnál kétszer annyi folyadékot szorít ki, mint az anódon képződő oxigén (o). Ez jól látható Grove eredeti rajzán.

Grove másik elektrokémiai cellája a XIX. században nagyobb karriert futott be, mint a gázcella. Ennek egyik elektródja kénsavoldatba merülő cink, míg a másik koncentrált salétromsavba merülő platina volt. A két térrészt likacsos, égetett agyag diafragma választotta el. Ennek a cellának a kapcsolási rajza kétszeresen volt (1,8–2 V) a Daniell-féle elem kapcsolási rajzához. Ezt az elemet kezdte használni *Mi-*

1. ábra. *William Robert Grove* portréja és a Grove-féle tüzelőanyag-cella rajza az eredeti közleményből [13]. A rajzon öt „gázelem” soros kapcsolása látható, amellyel vizet bont a különálló cellában.





2. ábra. A Bacon-féle alkalikus hidrogén–oxigén tüzelőanyag-elem, amelyet az Apollo űrprogramban használtak. Kivitelező: Pratt & Whitney Aircraft [14].

Michael Faraday (1791–1867) is a Royal Institutionban tartott előadásain. Kezdetben (1840–1860) ev volt az amerikai távíróhivatalok kedvenc áramforrása is, mert hosszú időn át, folyamatosan jelentős nagyságú áramot, körülbelül 12 A-t szolgáltatott. Az 1860-as években, amikor a távíróforgalom megnőtt és sok Grove-elem működött ugyanabban a helyiségben, mégis áttértek a Daniell-elemre, mert a Grove-cellák mérgező nitrogén-dioxidot bocsátottak ki.

Ki volt Grove? A walesi Swansea-ban született. Magántanulmányok után került az oxfordi Brasenose College-ba. Jogász lett, de természet-tudományos kutatásokat is folytatott. A London Institution kísérleti filozófia (tulajdonképpen fizika) professzora (1841–46), illetve a Royal Society titkára (1847–49) is volt. Elismert még az *On the Correlation of Physical Forces* című könyve, amely 1846-ban jelent meg és az energia-megmaradás törvényének meggyőző kifejtését tartalmazza. Ügyvédként jól keresett, 1853-tól jobbjára már csak jogásként dolgozott és futott be szép pályát. Működött a brit Polgári Peres Bíróságon és Legfelsőbb Bíróságon is. 1872-ben lovaggá ütötték. Nemcsak a tudománytörténet, hanem a walesi nép is számon tartja Grove teljesítményét, és beszavazták a 100 legnagyobb walesi (100 Welsh Heroes) közé. Igaz, hogy csak a 88. helyen van. Megelőzik politikusok (A. Bevan munkáspárti miniszter, a Nemzeti Egészségügyi Szolgálat létrehozója, David Lloyd George, az Egyesült Királyság egyetlen walesi származású miniszterelnöke), nemzeti hősök, akik történetesen az angolok elleni szabadságharcokat vezették (Owain Glydwr, Llywelyn ap Gruffudd), jobb helyezést kapott az énekes Tom Jones, a színész Richard Burton, a költő Dylan Thomas, a filozófus Bertrand Russell, a Nobel-díjas fizikus, Brian Josephson, de még Arábiai Lawrence, a labdarúgó Ian Rush, H.M. Stanley újságíró (Livingstone megtalálója) vagy Henry Morgan, a kalóz, Jamaica kormányzója is. Viszont Grove mögött végzett a legendás Arthur király, sőt Rhys ap Gruffudd, Wales utolsó uralkodója. Azt hiszem, hogy a sorrend nálunk is hasonlóképp alakulna, Jedlik Ányos vagy Eötvös Loránd se jutna dobogós helyezéshez.

Azt szokták írni, hogy Grove után több mint 100 évig nem történt semmi a tüzelőanyag-cellák felhasználása tekintetében. Ez igaz is, meg nem is. Ténylegesen nem hasznosították ezt a jelentős találmányt, de erre folyamatosan voltak próbálkozások. F.W. Ostwald elméletileg értelmezte a tüzelőanyag-cellákban lejátszódó jelenségeket (1893), míg L. Mond és C. Langer durranógáz-eleme (1889), illetve W.W. Jacques szén/levegő-eleme (1890), működőképesnek bizonyult. Ahhoz azonban, hogy valóban jó hatásfokú, nagy áramsűrűségű eszközt szerkesszenek, csak akkor nyílt mód, amikor az elektród-folyamatok kinetikájának törvényszerűségeit sikerült feltárni (T. Erdely-Grúz, M. Volmer, 1930) [6], a katalizátorok kutatása fellendült, és megfelelő tulajdonságú elektrolitokat állítottak elő. A korai történet F.T. Bacon (1904–1992) az 1930-as években kezdődő kutatásaival zárul, amely egyúttal megnyitotta az utat a modern fejlődéshez [14]. Bacon szerkesztette az első alkáli-küzelőanyag-cellát, amely 25 év fejlesztőmunka után az Apollo űrhajón szolgált (2. és 3. ábra). (Nem Bacon hibája volt, hogy az oxigéntartály az Apollo-13 űrhajóban felrobbant, ami majdnem tragédiához vezetett.) A különböző típusú tüzelőanyag-celláknak persze megvan a saját története. A foszforsav sokáig mellőzött volt, mert sokkal rosszul vezeti az áramot, mint a kénsav. G.V. Elmor és H.A. Tanner 1961-ben jött rá arra, hogy nagyobb hőmérsékleten a foszforsav már kielégítően vezet, viszont nem redukálódik, mint a kénsav. 1965-re készült el az első 5 kW-os, foszforsavas Allis-Chalmers-cella az amerikai hadsereg



3. ábra. Az űrhajósok tesztelik a tüzelőanyag-cellát a súlytalanság körülményei között [18].

részére, és azóta a fejlődés töretlen. Az 50–100 kW-os cellákat éppúgy használják autóbuszok energiaforrásoként, mint nagyobb teljesítményű változatait épületek világítási, fűtési igényeinek kielégítésére. A szilárd oxidos tüzelőanyag-cellák története a Nernst-féle izzóig nyúlik vissza [15], E. Baur és H. Preis 1930-as munkái, majd H.H. Möbius és sok más kutató kitarása vezetett oda, hogy 2000-re a Siemens Westinghouse 1152 cellából álló, 200 kW-os erőművei már egyenként 200 épület áramellátását biztosítják. A karbonátolvadékos cellák története párhuzamosan futott a szilárd oxidos cellákéval, szintén az 1960-as évek közepén jelentek meg a már jól használható prototípusok. Ma már 2 MW-os erőművek üzemelnek, de már elkészültek a 100 MW-os erőművek tervei is. Minden cellatípusnál nagy szerepet játszottak a folyamatos fejlesztés, újabb és újabb anyagok, de a polimer-elektrolit membránok előállítására valóban mérföldkövet jelentett, és kiváló példája annak, amikor egy új anyag, ötlet paradigmaváltást hoz egy adott területen. A polimer-elektrolit cellákat is az űrhajózás részére fejlesztették ki, és innen került át a technológia „földre” használatra, erőművekbe és gépkocsikba. A hatvanas évek végére az alapvető tüzelőanyag-elem-típusok már kézen álltak arra, hogy meghódítsák a világot. A klasszikus tüzelőanyag-elemek már korábban is szerepeltek a külföldi és magyar szak- és tankönyvekben, de a hatvanas években már az újabbról is hírt adtak [16, 17]. Ez időtől kezdve már sorra jelentek meg speciális könyvek a témakörben [18, 19]. Ezt a két művet azért is érdemes kiemelni, mert ezekben már megtalálható az összes ma használatos típus, és ehhez mérhető az azóta történt fejlődés. A haladás irányáról és sebességéről újabb könyvekből, folyóiratok különszámaiból, cikkeiből és speciális kiadványokból tájékozódhatunk [6, 10, 17–39].

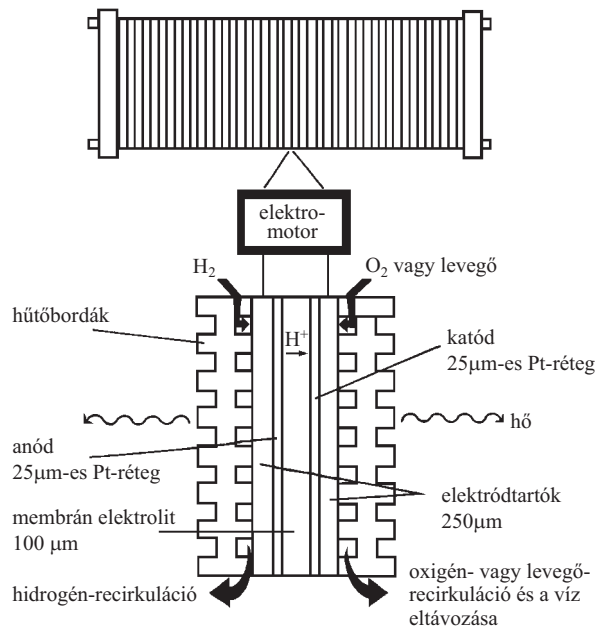
A tüzelőanyag-elemek különleges helye az elektrokémiai áramforrások között

Az elektrokémiai áramforrások működésének lényege az, hogy egy kémiai reakció szabadentalpia-változását alakítják át munkává. Ez úgy történik, hogy az anódon (a negatív elektródon) oxidáció (elektronleadás), míg a katódon (a pozitív elektródon) redukció (elektronfelvétel) játszódik le. Az elektronok a két elektródot összekötő fémes vezetón jutnak el az anódtól a katódig. Fogyasztó (pl. elektromotor) beiktatásával az elektronokkal munkát lehet végezteni, amelynek nagysága a két elektród közötti potenciálkülönbségtől és az áthaladt töltésmennyiségtől függ. A potenciálkülönbség nagysága az alkalmazott reakciópartnerek minőségétől, míg a hasznosítható töltésmennyiség azok mennyiségétől függ. Ha ugyanazt a mennyiségű tüzelőanyagot hőerőgéppben égetjük el (oxi-

dáljuk), a termelt hő által végzett hasznos munka hatásfoka a legjobb folyamatosan működő gépben is csak körülbelül 40%, hiszen a termodinamika II. főtétele elvi korlátot szab. A galvánelemek sokkal gazdaságosabban használják ki a kémiai reakciók szabadentalpia-változását, ezek hatásfoka 90% körüli. A galvánelemekben adott mennyiségű anyag van, a kémiai reakció végbemenetele után több energia nem nyerhető már ki. A primer elemek nem regenerálhatók, míg a szekunder elemek (akkumulátorok) igen. Ez utóbbiak esetén ellenkező irányú árammal (elektrolízissel), tehát energiabefektetéssel az eredeti állapot visszaállítható (töltés). Természetesen ez bizonyos energiavesztéssel jár, és egy akkumulátor is csak meghatározott számú töltési-kisütési ciklust visel el. Az akkumulátorok jóságát a nagy töltés- és energia-hatásfok, illetve ciklusszám jelzi. A tüzelőanyag-elemek különlegessége abban rejlik, hogy a kémiai reakcióban részt vevő komponenseket folyamatosan vezetjük be a cellába, tehát mindaddig működnek, amíg az anyagutánpótlást biztosítjuk. A galváncellák elektronvezetőkből (legtöbbször fémekből) és ionvezetőkből (elektrolitoldatok, olvadákok, szilárd ionvezetők) hozhatók létre. Az egyidejűleg, de térbelileg elválasztva lejátszódó oxidációs-redukációs folyamatokban természetesen nemcsak ionok, hanem töltéssel nem rendelkező molekulák is részt vehetnek. Ez a helyzet a tüzelőanyag-elemek esetében is. A kémiai reakció egyébként is eredően semleges anyagokkal írható fel, hiszen például a Daniell-elemben a tényleges kémiai anyagoknak (Cu, CuSO₄, Zn, ZnSO₄) sincs töltésük. Az más kérdés, hogy az elektródokon ionok vesznek el töltésüket vagy elsődlegesen ionok keletkeznek. A termodinamika – tehát az energiatermelés – szempontjából közömbös, hogy Cu²⁺- és SO₄²⁻-ionokról vagy ezek semleges kombinációjáról van-e szó.

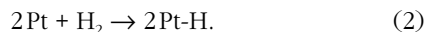
A tüzelőanyag-elemek hatásfoka és teljesítménye

A galvánelemek hatásfokát legegyszerűbben úgy adhatjuk meg, hogy a kalorikus adatokból kiszámítható szabadentalpia-változás hányad részét alakíthatjuk át munkává. A veszteség jelentős része az ellenállásokon történő feszültségvesztéssel függ össze. A cellán átfolyó áram és a terhelő ellenállás nagyságától függ. Adott áramerősség (I) esetén a cella belső ellenállása (R) miatt IR ohmikus feszültségvesztéssel kell számolni. Ezért az alkalmazott ionvezetőt úgy választjuk meg, hogy ellenállása a lehető legkisebb legyen. Az elektrolitnak még sok más szempontot is ki kell elégítenie, így például stabilnak kell lennie az adott feszültségtartományban, vagy nem szabad megfagynia. Az elektrolit minőségével kapcsolatos megfontolások rávilágítanak arra, hogy mi a célja a jelenleg is folyó intenzív kutatásnak. Ez éppen a hatásfok és a teljesítmény növelése, ami csak úgy lehetséges, hogy az adott célra egyre jobb és olcsóbb anyagokat találunk. A másik veszteségforrás az elektródreakciók ellenállásával kapcsolatos. A töltésátlépésnek gyorsnak kell lennie. Ha bármelyik elektródreakciónak nem elegendően nagy a se-



4. ábra. Egy protoncserélő membránt tartalmazó tüzelőanyag-elem (PEMFC) felépítése.

bessége, az értelemszerűen meghatározza az áram nagyságát. A sebesség az aktiválási energia nagyságával függ össze, nagy aktiválási energia újfent energiavesztéset okoz. Ezért olyan elektródot kell választani, amely katalizálja az adott reakciót. A tüzelőanyag-cellánkban H₂-t akarunk oxidálni. E folyamat csereáram-sűrűsége – ez jellemzi az adott elektródreakció sebességét – nyolc nagyságrendet is változhat attól függően, hogy milyen anyagból van az elektród. A legjobb katalizátor a platina. A platínával ugyanis a hidrogén reakcióba lép és disszociatív adszorpciót szenved:



Amikor ez a folyamat nem játszódik le, például higanyon, az igen stabil H₂-molekula atomokra való bontásához 431 kJ mol⁻¹ energia szükséges. Az sem jó, ha az adott fém túl erősen köti meg a hidrogénatomokat, mert akkor ezek deszorpciója igényel nagy energiát. Az adszorpciónál, katalízisnél nemcsak a fém minősége, hanem a felület állapota is kritikus, ezért annak kialakítása (nagy felület/térfogat arány, aktív helyek számának növelése, a katalizátor mérgeződésének csökkentése) is meghatározó tényező. A platina a legjobb, viszont drága és ritka fém. Ezért a platínát vagy ötvözetét minél kisebb mennyiségben kell leválasztani a hordozó, például protoncserélő membrán felületére. Vannak olyan tüzelőanyag-cellák, amelyek nagy hőmérsékleten (600–1000 °C) működnek, ezekben a folyamat már elég gyors, és a platinaelektród is kiváltható más fémmel vagy ötvözzel. A nagyobb hőmérséklet előnye még, hogy a katalizátor mérgeződésével sem kell számolni a deszorpció sebességének növekedése miatt. A teljesség kedvéért megemlítjük még azt is, hogy az anyagtranszport sebessége is nagymértékben befolyásolhatja az elem működését. A pórusos elektród és membrán, a cellageometria kialakítása, a gáz áramlási sebességének optimalizálása is komoly mérnöki feladat.

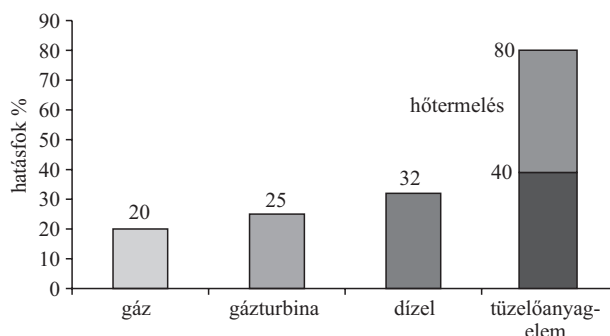
A tüzelőanyag-elemek fajtái

Sokféle tüzelőanyag-cellát fejlesztettek ki, de alapjában véve megkülönböztethetünk közönséges hőmérsékleten és nagy hőmérsékleten működőket. Az előbbieket könnyen elviselnek sok be- és kikapcsolást, ez előnyös például gépjárműveknél, míg az utóbbiak inkább folyamatos üzemben, például erőművekben hasznosíthatók. A tüzelőanyag fajtáját, az elektrolit és más komponensek minőségét, valamint a felépítésüket tekintve jelenleg számos, különböző típusú tüzelőanyag-cella van forgalomban. Nézzük meg a fontosabb típusokat!

Szilárd polimerelektrolit membránt tartalmazó elemek (PEMFC = *polymer electrolyte membrane fuel cell*, SPEFC = *solid polymer electrolyte fuel cell*)

Ilyen elemek lelke egy 0,1 cm-nél vékonyabb, hidrátált protoncserélő membrán, amely csak a H⁺-ionokat engedi át (4. ábra). A membránt mindkét oldalán porózus katalizátorral, általában platinával vonják be. A hidrogént és az oxigént (levegőt) a membrán két ellentétes oldalán vezetik a cellába. A hidrogénből keletkező H⁺-ionok áthaladva a membránon, annak másik oldalán az oxigénredukció termékével, az OH⁻-ionokkal vízzé egyesülnek. Az első protoncserélő membránt tartalmazó cella 1962-ben a Gemini űrhajón jutott fel az űrbe. 1967 óta a DuPont cégnek a NASA részére kifejlesztett termékét, a Nafiont, ami egy perfluorozott szulfonsav-membrán, használják legelterjedtebben. Ez a cella kis méretű, egy 1 kW-os egység 50 literes. Az energiaátalakítás hatásfoka 65%-os volt az űrmissziók során, amikor a keletkező vizet is hasznosították [6, 10]. Ezek a cellák aránylag kis teljesítményigényű, többszöri és gyors be- és kikapcsolással működő alkalmazásokra készülnek. A platina mennyiségének és a membrán árának csökkenésével egyre olcsóbbá válnak. Az elmúlt 10 évben már olcsóbb (20–100 USD/m²) membránokat is kifejlesztettek, de a Nafionnál is jobb Dow membránok ára 780 USD/m². Ez a membrán tetrafluoretilén és viniléter kopolimerizációjával készül. A teflonszerű polimerlánchoz éterkötéssel csatlakoznak a szulfonát-csoportok, tehát a szerkezete igen hasonló a Nafionéhoz. A jobb vezetési, stabilitási tulajdonságait a rövidebb oldallánccal hozzák összefüggésbe [35].

Ilyen cellákban nemcsak hidrogén, hanem szerves vegyületek is oxidálhatók. Ezek közül a *metanollal mű-*



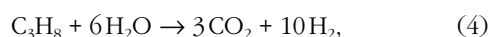
5. ábra. A foszforsavas tüzelőanyag-elem és más, elektromos energia-termelési technológiák hatásfokának összehasonlítása. Forrás: United Technologies.

ködő tüzelőanyag-elemek (DMFC = *direct methanol fuel cell*) tettek szert jelentőségre, amelyekben a következő cellareakció megy végbe:



Az Apollo űrhajókban és az űrkompokban azbesztszeparátoros *alkálikus H₂/O₂ tüzelőanyag-elemeket* (AFC = *Alkaline fuel cell*) használtak. Ezekben az elektrolit kálium-hidroxid. Hatásfokuk kiváló, de drágák, és érzékenyek szén-dioxidra. Csak néhány speciális alkalmazásról tudunk.

A *foszforsav tüzelőanyag-elem* (PAFC = *phosphoric acid fuel cell*) jelenleg a legszélesebb körben használt típus. Ennek működési hőmérséklete körülbelül 200 °C és nagyobb mértékű energiaigények kielégítésére képes, így használható lakó- és irodaépületek, kórházak elektromos árammal való ellátására, de autóbuszok energiaforrásaként is. Épületeknél, ahol az árammal egyidejűleg keletkező hő is fel lehet használni fűtésre, 80%-osnál jobb hatásfokot is el lehet érni (5. és 6. ábra). Az aránylag nagy hőmérséklet csökkenti a platinakatalizátor dezaktivizálódását. Ennek következtében a hidrogénnek nem kell nagy tisztaságúnak lenni, mint az AFC-egységekben. A hidrogént reformálással szénhidrogénből, például propánból állítják elő:

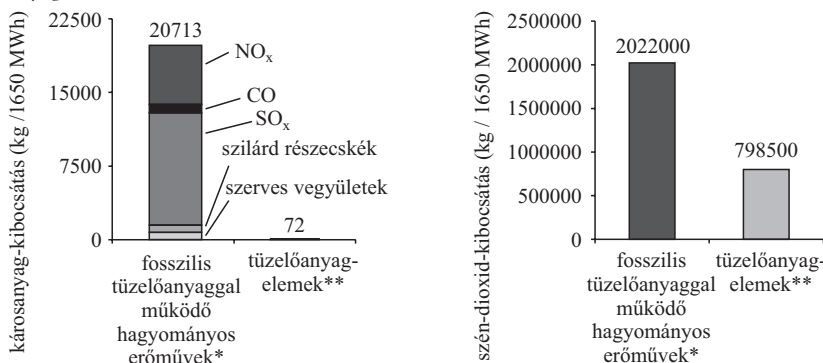


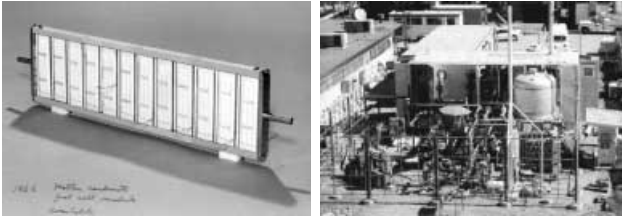
és ez a hidrogén, valamint a levegő oxigénje működteti a cellát. A hátránya egy hő- vagy atomerőműhöz képest a rövidebb élettartam.

A *karbonátolvadékos cellák* (MCFC = *molten carbonate fuel cell*), amelyekben az elektrolit K₂CO₃- és Li₂CO₃-olvadékkal impregnált kerámiahordozó, nagy hőmérsékletű, helyhez kötött nagy és folyamatos energiafelhasználásra tervezett áram- és hőforrások (7. ábra). Az anód nikkellal, a katód nikkellal-oxid, az oxidálószer levegő és szén-dioxid, a fűtőanyag metán, hidrogén és a reformálás melléktermékeként keletkező szén-monoxid. A hőfelhasználással együtt a hatásfok meghaladja a 85%-ot.

A *szilárd oxidos tüzelőanyag-elem* (SOFC = *solid oxide fuel cell*) névadója az itriummal stabilizált cirkónium-di-

6. ábra. A károsanyag-kibocsátás összevetése. Forrás: United Technologies. (* 83% szén, 11,5% földgáz, 5,5% olaj „átlagos” tüzelőanyaggal számolva, ** földgázzal működő tüzelőanyag-elemek.)



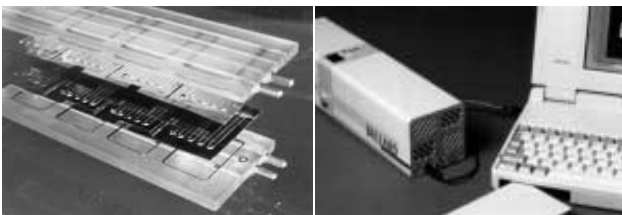


7. ábra. Karbonátolvadékos tüzelőanyag-elem, amelyet az amerikai hadseregnek készített a Texas Instruments 1966-ban (balra) és a 250 db karbonátolvadékos tüzelőanyag-elemmel működő, 210 kW-os erőmű, San Diego, California 1997 (jobbra).

oxid elektrolit, amelyben az unipoláris vezetést az O^{2-} ionok biztosítják. A katód $La-Sr-MnO_3$, az anód $Ni-Zr_2O_3$. A tüzelőanyag ebben is CH_4 , reformált H_2 és CO . Igen nagy a teljesítménysűrűsége (240 mW cm^{-3}), a hatásfoka körülbelül 45%. Működési hőmérséklete $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, ezért kifejezetten ipari áramforrás, közlekedési eszközökben nem ajánlott.

A felsorolt tüzelőanyag-cellák azok, amelyeket a kereskedelemben már forgalmaznak, amelyekből már sok működik, illetve amelyeket a közeljövőben áramforrásként használni fognak különböző célokra (8. ábra), kisméretű számítógépelemként (50 W), közlekedési eszközök energiaforrásaként (50–100 kW), illetve áramtermelő erőművekben (250 kW – 10 MW). Tüzelőanyagul szolgálhat még földgáz, hidrazin vagy más szerves vegyület, sőt szén is. Van olyan cella is, amelybe oxigén helyett klórt vezetnek, a Li fém az oxidálható anyag, a reakció terméke pedig LiCl, amelyből elektrolízissel regenerálhatók a kiindulási anyagok. Jó tapasztalatok vannak a Zn–levegő rendszerrel is. Egy cinkkazettával az autó körülbelül 300 km-t tud megtenni, az elhasználandó kazettát pillanatok alatt ki lehet cserélni. A gépjárművekben egyelőre az úgynevezett hibrid megoldás terjedt el. Ez azt jelenti, hogy a tüzelőanyag-elem mellett egy szekunder elem is van, például a Ford, a Daimler–Chrysler, a Nissan és a Toyota elektromos autókba nikkél–fémhidrid akkumulátort is beépítettek. A robbanómotor–akkumulátor (tüzelőanyag-elem) hibrid pedig már régen alkalmazott megoldás, az utóbbi a városi közlekedés során szolgáltatja az energiát. Az akkumulátor–tüzelőanyag-elem, vagy újabban a szuperkapacitás–tüzelőanyag-elem kombinációinál az első elem az indításnál és fékezésnél, míg a tüzelőanyag-elem a folyamatos haladásnál szolgál energiaforrásként. Speciális célokra és igények kielégítésére is sokféle cellakonstrukció készült. Gondoljunk az űreszközök áramforrásaira, amelyeknél követelmény a nagy energia- és teljesítménysűrűség, szélsőséges hőmérsékletek és rázkódás elviselése, valamint a nagy élettartam. Itt az ár

8. ábra. Mobiltelefonokhoz kifejlesztett mikrotüzelőanyag-elem, 2000 (balra) és Ballard gyártmányú tüzelőanyag-elem, hordozható számítógépekhez, 2000 (jobbra).

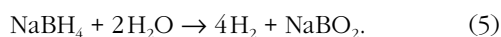


kevesbé számít, tehát drága anyagokat is alkalmazhatnak, viszont a tömeg és a térfogat a kritikus, hiszen az űrhajó mérete határt szab, és az egységnyi tömegnek az űrbe juttatása az igazán jelentős költség. A tömeggyártásnál viszont a lehető legolcsóbb anyagokkal és a legegyszerűbb konstrukcióval lehet csak versenyképes a termék. Éppen az ár csökkentése és az élettartam növelése az a két kritikus pont, amelyet minden elemzés megemlít. A hidrogén–oxigén-cellában a reakciótermék víz, míg más vegyületeknél mérgező köztitermékek és végtermékek képződhetnek. Ekkor éppen az egyik nagy előny vész el, hiszen a környezetvédelmi szempont az egyik legjelentősebb motiváció. A hidrogénnel és a platinakatalizátorral kapcsolatos gondokkal – alapvető fontosságuk miatt – külön is foglalkozunk.

A hidrogén előállítása és tárolása

A hidrogén tisztasága kritikus tényező a közönséges hőmérsékleten működő tüzelőanyag-celláknál, mert a szennyeződés tönkretelheti a katalizátort. Tehát az ideális megoldás a hidrogén előállítására a víz elektrolízise lenne. Ez azonban nagyipari méretekben jelenleg drága. A jóslatok szerint a nap-, a szél- és a geotermikus megújuló energiaforrások jobb kihasználása az elektromos áramot olcsóbbá teheti, és akkor az elektrolízis versenyképes lehet. Hidrogén előállítható olyan molekulákból, amelyek tartalmazzák, ezen alapul a metanol vagy a földgáz reformálása. Ez megoldható a gépkocsiban is, tehát nem palackos hidrogént kell magukkal vinniük, hanem metanolt vagy szénhidrogént (pl. metánt) tankolhatnak. A reformálási reakció (ld. pl. a (4) egyenletet) úgy játszódik le, hogy az elpárologtatott metanolt (vagy szénhidrogént) katalizátor fölött vezetik át egy fűtött csőben, ahol is CO , H_2 és O_2 keletkezik, majd az oxigén tovább oxidálja a szén-monoxidot CO_2 -vé. E módszer hátránya, hogy a szén-monoxid egy része a levegőbe kerülhet, illetve mérgezi a katalizátort. A teljesség kedvéért megemlítjük még a hidrogén klasszikus előállítási módját, vagyis erős savak (HCl , H_2SO_4) reakcióját fémekkel (Zn , Fe). Jacques Charles ugyan 1783-ban e reakció segítségével töltötte meg hidrogénes léggömbjét, és a laboratóriumban még ma is használjuk a Kipp-készüléket, de ez az eljárás ipari mennyiségű hidrogén előállítására alkalmatlan. Kérdés az is, hogy ha a gépkocsi hidrogént visz magával, azt milyen módon tegye. A hidrogén gáz formában csak rövid útra elegendő, hiszen aránylag kis mennyiség nagy térfogatú tartályt igényelne. Folyékony állapotban tárolt hidrogénnél ugyan nagyobb az energiasűrűség, de ez csak kis hőmérsékleten, illetve nagy nyomáson valósítható meg. Az acélból készült palack, amelyet a laboratóriumokban is használunk, szóba jöhet a tárolásnál. A piros jelzésű palackokban a hidrogént 150 bar nyomáson hozzák forgalomba. Ezek a palackok nehezek, még nagyobb nyomáson is a hidrogén tömege csak az össztömeg 0,5–1%. Balesetnél a szétrepülő acéldarabok veszélyesek lehetnek. Valamivel jobb a helyzet kompozit (főleg polietilén alapú) palackoknál, itt a tömeg 7%, nagyobb nyo-

más is elérhető, a palack alakja a gépjárműhöz alakítható, és balesetnél az ütközési energia jelentős részét elnyeli. Az újabb törekvések közül említést érdemel a hidrid formájában való tárolás. Különösen a vas-titán-hidridek (FeTiH, FeTiH₂), lantán-nikkel-hidridek (LaNi₅H₇), és a nátrium-bór-hidrid, nátrium-boranát (NaBH₄), amelyek tárolóképessége mintegy 30 g H₂ / 1 kg hidrid, jutott eddig jelentősebb szerephez. Ezekből víz és katalizátor hatására szabadítható fel a hidrogén:



A másik termék, a NaBO₂ nem mérgező, sőt például mosószerek adalékanyagaként használják. A NaBH₄ alkalmazásával jelentősen megnövelhető az adott térfogatban szállítható hidrogén mennyisége, jelenleg egy „tankolással” 150–500 km tehető meg. Ezt a megoldást először a Daimler–Chrysler kisbuszájánál alkalmazták 2001-ben. Az egyetlen, de nagy hátránya a vegyületek ára.

A legújabb ötletek közé tartozik, hogy nagy nyomáson és hőmérsékleten hidrogént préselnek szén nanocsövek vagy zeolitok üregeibe. A hidrogén közönséges hőmérsékleten nem, csak hevítés hatására szabadítható fel.

A hidrogénhez a benzinkutakhoz hasonló töltőállomásokon lehet (majd) hozzájutni. Ennek az infrastruktúrának kiépítése szintén központi kérdés. A jövő idő használata jogos, de tulajdonképpen már a jelenről beszélhetünk, hiszen 2002-ben már 8 töltőállomást, kettőt az USA-ban, négyet Japánban és kettőt Európában már megnyitottak.

Végezetül szólnunk kell a hidrogén használatával kapcsolatos biztonsági problémákról. Gondolom, hogy e témában mindenkinek a léghajó-katasztrófák jutnak eszébe. A Hindenburg léghajó katasztrófáját azonban igazából az éghető anyagból készült váz és a fedélzeten tárolt dízelolaj okozta. Az igaz, hogy a hidrogén éghető és robbanásveszélyes gáz, de sok szempontból biztonságosabb, mint a benzin, amelyet robbanómotorokban (!) használunk. A hidrogén kis sűrűsége miatt ugyanis igen gyorsan eltávozik a levegőbe, ha a tartály ereszt vagy kilyukad, így a robbanáshoz szükséges hidrogén–oxigén gázkeverék nem jön létre. Megjegyezzük, hogy hidrogénből négyszer akkora koncentráció kell a robbanáshoz, mint benzinből! Az Egyesült Államokban széles körű oktatási programot indítottak, hogy meggyőzzék az embereket a hidrogén használatának biztonságos voltáról.

Van néhány olyan kérdés, amelyeket viszont még meg kell vizsgálni. Eddig is került hidrogén emberi tevékenység nyomán a levegőbe. Ez azonban nem vethető össze a mennyiséggel, amely akkor keletkezne, ha több 10 vagy 100 millió jármű ezzel a gázzal üzemelne. A töltőállomásokon valamennyi – esetleg csak néhány ezrelék – hidrogén elszökhet. Ez a légkör felső rétegébe kerül, ahol a kifejett hatásáról még nincs világos képünk. (A felszínhez közeli levegőben 5×10^{-5} térfogatszázalék hidrogén van, a magassággal aránya egyre nő, 2000–20000 km magasságban pedig egy hidrogénből álló övezet húzódik. Ide jutna az újabb mennyiség is.) A sokat népszerűsített metanolnál azzal a veszéllyel kell számolnunk, hogy az erősen mérgező, vakságot, illetve halált okozhat. Vízzel korlátlanul elegyedik, tehát ha tartályból

vagy csővezetékéből élő vízbe kerül, súlyos károkat okozhat. Persze használhatnánk etanolt is a metanol helyett, de ennek komplikációit – úgy vélem – nem szükséges részleteznem.

Lesz-e elég platina?

A platinát és a platinacsoport más fémait jelenleg is alkalmazzák katalizátoros autókban a mérgező CO- és NO-gázok ártalmatlan anyagokká, így szén-dioxiddá, illetve nitrogénné való átalakítására. Persze e fémek igen népszerűek más területeken is, orvosi implantátumok, nagy szilárdságú hőálló ötvözetek (turbinalapátok, rakétacsúcsok, téglék, fűtőszálak stb.), merevlemezek és ékszerkészítését említjük csak hamarjában. A történelem folyamán összesen körülbelül 3000 t platinát termeltek ki. A jelenlegi 150–250 t/év termelés (pl. 180 t 2000-ben) 63%-át már most is az autóipar használja fel. A cél az, hogy 2025-re az autók 25%-a hidrogénhajtású legyen. Egy-egy autó legalább 75 kW-os tüzelőanyag-cellát igényel. Ha a felhasználandó platinamennyiséget a kívánatos mértékben tudjuk csökkenteni (a cél 0,2 g Pt / 1 kW), akkor az éves platinai igény a tüzelőanyag-cellák gyártásához 150–300 t/év. Ez a mostani termelés (fő termelők: Dél-Afrika 50%, Oroszország 35%) szinten tartásával és a platina visszanyerésével biztosítható. A platinakészlet is még hosszú ideig elegendőnek tűnik, az ismert tartalék 5000 t (75%-a Dél-Afrikában), a további becsült mennyiség körülbelül 30000 t.

Minek nevezzetek?

Az utóbbi időkben némi zavar keletkezett a „fuel cell” magyarázását illetően. Ennek egyik oka, hogy *Oláb György* Nobel-díjas kémikus több előadást tartott a témában, amelyek írásos anyaga is megjelent [40]. Ő az „üzemanyagcella” kifejezést használja. Ez a név a közlekedési eszközökben alkalmazott áramforrásokra utal, és legfeljebb e kategóriát indokolt e megnevezéssel illetni. A hivatalos magyar kémiai elnevezés: tüzelőanyag-elem [41], ami kifejezi az egyéb, például erőműi alkalmazásokat is. Régebben a „tüzelőszer-elem” volt használatban [16], ami érdekes asszociációkra ad lehetőséget, főleg egybeírva: „tüzelőszer-elem” [41].

Az ember és a tüzelőanyag-elem

Az emberi szervezetben, ahol a vér az elektrolit, élelmiszert (cukrot, zsírt) égetünk el katalitikusan, enzimek segítségével, és így termelünk – többek között elektromos – energiát. *E. Schrödinger* szerint azért nem szentet vagy hidrogént fogyasztunk, mert az élő szervezet nagy szervezetségű, sajátos rendet képviselő anyag, amelynek szüksége van az entrópiájának csökkentésére, és ezt éppen a táplálék lebontásával érjük el [42]. Tetszetős, de nem teljesen helytálló Schrödinger elmélete. Mindazonáltal bizonyos azonosság köztünk és a tüzelőanyag-elemek között fennáll. Talán tökéletesebb szerkezetek vagyunk, mint a tüzelőanyag-elemek, viszont a zéró-emisszió szigorú követelményeinek nem felelünk meg.

Európa is felzárkózik

Bush elnök említett beszéde természetesen szakértői anyagok alapján készült, és az amerikai kormányzat igencsak meggondolta azt, hogy mit támogat 1,2 milliárd dollárral. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának 2003. évi beszámolója a jelen helyzet és a tenniva-

lók sokoldalú összefoglalását tartalmazza, pontosan megjelöli a célokat és indokolja az állami szerepvállalás szükségességét. Ez utóbbi felöleli a megfelelő infrastruktúra létrehozását, valamint szabványok és biztonsági előírások megalkotását. D.K. Garman, az Energiaügyi Minisztérium felelős tisztviselője a részletes anyaghoz (*Fuel Cell Report to Congress*) mellékelte, C.H. Taylor képviselőházi bizottsági elnöknek küldött, 2003. február 28-i keltezésű kísérőlevele tartalmazza a legfontosabb tényezőket. Érdemes egy mondatát idézni, amely az ügy horderejét mindennél jobban fejezi ki, és amely a számunkra is iránymutatásul szolgálhat: „A tüzelőanyag-cellák egyedülálló lehetőségeket kínálnak a Nemzetnek a közlekedés és a helyhez kötött áramforrások energiateljesítményének és károsanyag-kibocsátásának példa nélküli csökkentésére.”

Az Európai Bizottság is felismerte a tüzelőanyag-elemek jelentőségét, és már az 1970-es évek közepén elindított kutatás-fejlesztési programot. Ez a cél a különböző keretprogramokban (Joule, *Fourth Framework Program*) is szerepelt. Az erre szánt összegeket szerényebbek voltak, mint az amerikaiak (pl. 1999 és 2002 között összesen 127 millió euro). 2002-ben viszont igen nagy mértékben megemelték az összeget, 2003 és 2006 között összesen 2,12 milliárd eurót szánva erre a célra. Európában főleg a polimer-elektrolit-membrános tüzelőanyag-elemek fejlesztésére és ezek gépjárművekben való hasznosítására fordítottak figyelmet és pénzt. Európa nagy cégei fogtak össze. Az autógyártók (Renault, Peugeot, Citroën, Volvo, Volkswagen, BMW) tervezték, építették és tesztelték a kocsikat, a De Nora cég szállította a tüzelőanyag-elemeket, az Air Liquid of France a hidrogént, a Ballard cégtől vették a metanolreformer. Hasonló társulások alakultak erőművek építésére is. Az első 250 kW-os, PEMFC egységeken alapuló erőművet Berlinben mutatták be, 2003-ban kezdett működni egy 1 MW-os Siemens Westinghouse erőmű, amelyben SOFC egységek szolgáltatják az energiát. Hasonló törekvésekről érkeztek hírek Japánból, Dél-Koreából, Kanadából és Ausztráliából is. A magyar hozzájárulás egyelőre szerény. Az elektrokémikusok, az energiagazdálkodási és környezetvédelmi szakemberek szorgalmazzák, hogy a kutatás-fejlesztési irány nagyobb hangsúlyt kapjon hazánkban is. Az EU FP5 és FP6 programok lehetőséget nyújtanak nekünk is a pályázásra. Reméljük, hogy várhatóan Magyarországon is majd kapható elektromos gépjárművek és épülő erőművek tüzelőanyag-elemében a magyar kutatók és mérnökök szellemi munkája is testet fog ölteni.

Irodalom

1. <http://www.whitehouse.gov/news.html>
2. <http://www.h2fc.com/gov/federal.shtml>
3. *National Hydrogen Energy Roadmap document* – US Department of Energy, 2002
4. *Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990–2000* – Environmental Protection Agency, 2002. április
5. *Fuel Cell Report to Congress*, 2003. február
6. INZELT GY.: *Az elektrokémia korszerű elmélete és módszerei I–II.* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999.
7. C.P. CHEN, M. VREEKE: *Report on the electrolytic industries for the year 1996* – J. Electrochem. Soc. 144 (1997) 3674
8. J.W. WEICHNER, M. DOYLE: *Report on the electrolytic industries for the year 1999* – J. Electrochem. Soc. 147 (2000) 3953
9. M. DOYLE, P. ARORA: *Report on the electrolytic industries for the year 2000* – J. Electrochem. Soc. 148 (2001) K1–K4
10. INZELT GY.: *Kalandozások a kémia múltjában és jelenében* – Vince Kiadó, Budapest, 2003

11. W.R. GROVE: *On Voltaic series and the combination of gases by platinum* – Philosophical Magazine and Journal of Science 14 (1839) 127
12. W.R. GROVE: *On gaseous Voltaic battery* – Philosophical Magazine and Journal of Science 21 (1842) 417
13. W.R. GROVE – Proc. Roy. Soc. 4 (1843) 463
14. F.T. BACON: *The fuel cell: Some thoughts and recollections* – J. Electrochem. Soc. 126 (1979) 7C
15. H.H. MÖBIUS: *On the history of solid electrolyte fuel cells* – J. Solid State Electrochem. 1 (1997) 2
16. ERDEY-GRÚZ T., SCHAY G.: *Elméleti fizikai kémia III.* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1962
17. GÁSPÁR L., VÁRHELYI T.: *Vegyvi energiából villamos energia* – A technika fejlődése, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1966, 105–115
18. W. MITCHELL: *Fuel cells* – Academic Press, New York, 1963
19. J. O'M. BOCKRIS, S. SRINIVASAN: *Fuel cells* – McGraw-Hill, New York, 1969
20. A.J. APPLEBY: *Fuel cell handbook* – Van Reinhold, New York, 1989
21. KISS L.: *Bevezetés az elektrokémiába* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997
22. L. BLOMEN, M. MUGERVA: *Fuel cell systems* – Plenum, New York, 1993
23. P. BREEZE: *Power generation technologies* – Financial Times Energy, London, 1998
24. M.P. HOGARTH, G.A. HARDS: *Direct methanol fuel cells* – Platinum Metals Rev. 40 (1996) 150
25. T.R. RALPH: *Proton exchange membrane fuel cells* – Platinum Metals Rev. 41 (1997) 102
26. C. O'DRISCOLL: *Fuelling the future* – Chem. in Britain (1995) 655
27. D. SIMONSSON: *Electrochemistry for a cleaner environment* – Chem. Soc. Rev. 26 (1997) 181
28. N.Q. MINH, T. TAKAHASHI: *Science and technology of ceramic fuel cells* – Elsevier, Amsterdam, 1995
29. D.S. CAMERON: *Developing a fuel cell manufacturing industry* – The Eighth Grove Fuel Cell Symposium (2003), Platinum Metals Rev. 48 (2004) 32
30. T.A. RAMANARAYANAN, S.C. SINGHAL, E.D. WACHSMAN: *High temperature ion conducting ceramics* – Interface 10/2 (2001) 22
31. D.P. WILKINSON: *Fuel cells* – Interface 10/1 (2001) 23
32. G. INZELT, M. PINERI, J.W. SCHULTZE, M.A. VOROTYNTSEV: *Electron and proton conducting polymers* – Electrochim. Acta 45 (2000) 2403
33. O. YAMAMOTO: *Solid oxide fuel cells* – Electrochim. Acta 45 (2000) 2423
34. F. BECK, P. RÜETSCHI: *Rechargeable batteries* – Electrochim. Acta 45 (2000) 2467
35. O. SAVADOGO: *Solid polymer electrolyte membranes for fuel cell systems* – J. New Materials for Electrochem. Systems 1 (1998) 47
36. *Electrocatalysis* – Electrochim. Acta 44/8–9 (1998), 45/25–26 (2000)
37. *Polymer electrolytes* – Electrochim. Acta 40/13–14 (1995), 43/10–11 (1998), 45/8–9 (2000), 46/10–11 (2001)
38. *Fuel cells* – Electrochim. Acta 40/3 (1995), 43/24 (1998)
39. V. SRINIVASAN, L. LIPP: *Report on the electrolytic industries for the year 2002* – J. Electrochem. Soc. 150 (2003) K15
40. OLÁH GY., ÁNISZFELD R.: *Új generációjú üzemanyagcellák* – Magyar Tudomány 12 (2002) 1564
41. ERDEY-GRÚZ T., FODORNÉ CSÁNYI P.: *A magyar kémiai elnevezés és helyesírás szabályai* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972, II. kötet 575. o.
42. E. SCHRÖDINGER: *Mi az élet?* – Válogatott tanulmányok, Gondolat, Budapest, 1966

A GE Consumer & Industrial, Lighting – a világ fényforráspárának meghatározó vállalata – Technológia Szervezetébe keres

KISŰLŐLÁMPA-FEJLESZTŐ MÉRNÖKÖT

Fő feladatai:

- Nagynyomású kisülőlámpa tervezése és fejlesztése;
- Alapvető kisülésfizikai és -kémiai ismeretek alkalmazása a lámpatervezés területén;
- Beszállítókkal és vevőkkel való kapcsolattartás új termékek bevezetésénél;
- Statisztikai eszközök magas szintű használata.

Az ideális jelölt:

- Fizikusi, villamos- vagy vegyészmérnöki végzettséggel (PhD előny);
- Középfokú angol nyelvtudással rendelkezik;
- Gyakorlott számítógépes felhasználó;
- Jártas a matematikai-statisztikai eszközökben;
- Képes nagy mennyiségű munka elvégzésére és a határidők betartására;
- Globális csapatban hatékonyan tud dolgozni.

Kisülésfizika és/vagy terméktervezés területén szerzett tapasztalat előnyt jelent.

Amit kínálunk: • Versenyképes jövedelem • Együttműködés nemzetközi csoportban • Tréning • Szakmai fejlődési lehetőség.
Kérjük, hogy jelentkezését, mellékelve angol és magyar nyelvű önéletrajzzal a marta.boddi@ge.com email-címre szíveskedjen elküldeni.

