



BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM  
Közlekedésmérnöki Kar  
Járműgyártás és Javítás Tanszék

# **A tüzelőanyag-cella működése, felépítése, jellemzői**

Thiele Ádám  
WTOSJ2

Budapest, 2008

## Tartalomjegyzék

### **1. Általános megállapítások**

### **2. Történeti áttekintés**

### **3. A tüzelőanyag cella működése**

*3.1. Képződési szabadentalpia*

*3.2. Elektródpotenciál és standardpotenciál*

### **4. A tüzelőanyag-cella veszteségei**

*5.1. Belső ellenállás*

*5.2. Elektrolit ionkoncentrációja*

*5.3. Elektron átlépési veszteség*

*5.4. Diffúziós veszteség*

### **5. A tüzelőanyag-cella hatásfoka**

### **6. Néhány alapvető probléma tüzelőanyag-cella esetén**

*7.1. A platina katalizátor szénmonoxid „mérgezése”*

*7.2. A platina katalizátor széndioxid mérgezése*

*7.3. A tüzelőanyag-cella kapcsolófeszültség-változása a katód levegő hozzáférése esetén*

*7.4. A protonvezető membrán-elektrolitos tüzelőanyag cellák (PEMFC) membránnedvességi problémája*

### **7. PEMFC telep (stack) kialakítása tüzelőanyag-cellákból**

*8.1. Fémfólia alapú bipolar lemez*

*8.2. Grafitos bipolar lemez*

### **8. Egyéb tüzelőanyag-cella típusok**

*9.1. AFC (Alkaline Fuel Cell): Alkális oldatos tüzelőanyag-cella*

*9.2. DMFC (Direct metanol Fuel Cell): Direkt metanol tüzelőanyag-cella*

*9.3. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell): Foszforsavas tüzelőanyag-cella*

*9.4. MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella*

*9.5. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell): Magas hőmérsékletű kerámia-oxid alapú tüzelőanyag-cella*

### **9. Néhány jelenlegi alkalmazás, kutatás**

*10.1. Az Opel PEMFC tüzelőanyag-cellás prototípusa*

*10.2. Hidrogén biztosítása tüzelőanyag-cella előtti reformrendszerrel*

*10.3. Gázturbinával kombinált áramfejlesztés*

### **10. Felhasznált irodalom**

## 1. Általános megállapítások

*Definíció:* A tüzelőanyag-cella folyamatos üzemű galvánelem, kémiai energiát alakít át elektromos energiává (de járulékos hőenergia is keletkezik).

A tüzelőanyag-cellában szénhidrogénekben ( $C_xH_y$ ), más fosszilis energiahordozókban (például metanolban) illetve hidrogénben ( $H_2$ ) tárolt kémiai energia szabadítható fel és alakítható át villamos energiává, hozzávetőlegesen 70%-os hatásfokkal. A hőerőművekben történő kőolaj és földgáz elégetésével felszabadított hőenergiát a víz gőzzé alakítására fordítják, amely nagy nyomással, turbinákon átáramolva alakítja első lépésben mechanikai, majd a turbinákhoz kapcsolt generátorok segítségével villamos energiává alakítja a kémiai energiát. Ez az energiaátalakítási folyamat sokkal összetettebb módon jut el az energiahordozókból való villamos energia kinyeréséhez, mint a tüzelőanyag cella. Ha figyelembe vesszük minden energia átalakító gép veszteségét (turbina, generátor) és a hőveszteségeket is, legfeljebb 40%-os hatásfok érhető el. A tüzelőanyag-cellalába betáplált kiindulási anyagok a hidrogén vagy metanol ( $CH_3OH$ ), metán ( $CH_4$ ), illetve más fosszilis tüzelőanyagok, és az oxigén ( $O_2$ ) vagy szén-dioxid ( $CO_2$ ) illetve levegő. Ezek égésterméke tökéletes égés esetén csak víz ( $H_2O$ ), ha az égés nem tökéletes tüzelőanyag maradványok képződnek, például korom (C), szénmonoxid (CO). A definícióban is említett folyamatos üzem azt jelenti, hogy a villamos energia termeléshez szükséges a kiindulási anyagok folyamatos betáplálása, ellentétben az újra tölthető akkumulátorokkal, illetve az egyszer használatos, nem újra tölthető galvánelemekkel.

Ebben az írásban a tüzelőanyag cellák egyik típusát a protonvezető membrán-elektrolitos tüzelőanyag cellát (PEMFC) mutatjuk be részletesebben, rendszeresen utalva az általános működési elvekre, mert ez a legismertebb és legszélesebb körben alkalmazott típus. Stabil, és mobil rendszerek kiszolgálására is alkalmas.

## 2. Történeti áttekintés

A tüzelőanyag-cella története több mint 160 évre nyúlik vissza.

Christian Friedrich Schönbein (1799-1868) rájött arra, hogy ha hidrogén oxigénben vagy klórban ég el, akkor elektromos áram is keletkezik.

Sir William Robert Grove (1811-1896) a hidrogén oxigénnel történő reakcióját az elektrolízis fordítottjaként értelmezte, és kísérleteket végzett, amelyek során összeállított egy általa „gázakkumulátornak” nevezett tüzelőanyag cellát (1. ábra). A kísérletben két egymástól hermetikusan elválasztott üvegsőbe platina (Pt) elektródát tett, melyet az egyik üvegben tiszta hidrogén, a másikban tiszta oxigén gáz vett körül. A gázok és a platina elektróda híg kénsavas ( $H_2SO_4 + H_2O$ ), oldattal érintkeztek. Az így összeállított galvánelem elektródjai között feszültségkülönbség lépett fel és áram kezdett folyni. A kapcsolófeszültség növelésére több ilyen cellát kapcsolt sorba.

Wilhelm Ostwald (1853-1932) számításai szerint a tüzelőanyag-cella elméleti hatásfoka 80%-ra tehető. A működőképes és gyakorlatban is praktikus tüzelőanyag-cella előállítása azonban az akkori technikai színvonalon nem volt még lehetséges, így terjedtek el a villamos energia előállítására gőzturbinák és generátorok.

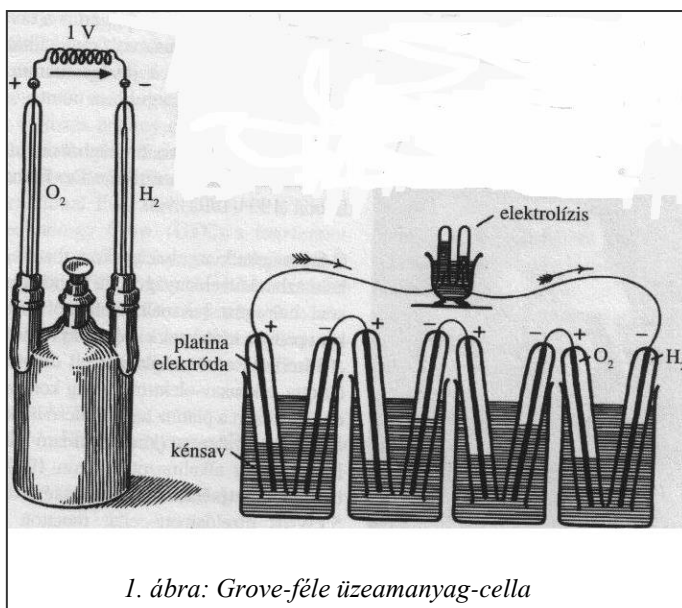
Dr. Francis Bacon (1904-1992) kifejlesztette az első gyakorlatban is alkalmazható tüzelőanyag-cellát. Ebben platina helyett nikkel (Ni) elektródákat, híg kénsav helyett alkálifém-elektrolitot, hajtóanyagként hidrogént és oxigént használt, és 5kW-os teljesítményt ért el. Ez volt a Bacon-cella.

A 60-as években a NASA az űrhajók fedélzeti áramellátására tüzelőanyag cellákat alkalmazott, melyek hajtóanyaga az űrhajó által folyékony állapotban szállított hidrogén és oxigén volt (Gemini és Apollo űrhajók).

A fejlesztéseknek nagy lökést adott a 70-es évek olajválsága, és a később egyre nyilvánvalóbbá váló fosszilis energiahordozók korlátozott mennyisége. Kísérleteket folytattak az amerikai International Fuel Cell és az Európai Űrkutatási Hivatal, főképp az elektrolitok tökéletesítése terén.

A 90-es években gépkocsik és buszok hajtására alkalmas tüzelőanyag-cellát fejlesztettek ki.

A múlt század utolsó évtizede a gépjárművekben alkalmazható tüzelőanyag-cella típusok fejlesztésével telt.



1. ábra: Grove-féle üzeanyag-cella

### 3. A tüzelőanyag cella működése

A definícióban már említettük, hogy a tüzelőanyag cella tulajdonképpen galvánelem. Tekintsük ezért át a galvánelemek működésére jellemző általános elveket!

#### 3.1. Képződési szabadentalpia

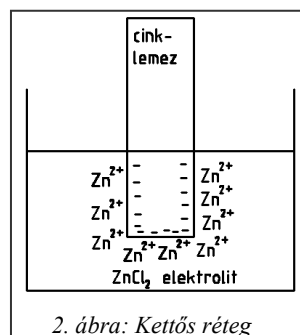
A galvánelemek működésekor kémiai energia alakul át elektromos energiává, miközben ionok keletkeznek és semmisülnek meg. Ahhoz, hogy ezek közül melyik folyamat melyik reakciópartnerrel játszódik le, segítséget nyújt a Gibbs-féle képződési szabadentalpiák ismerete (1. táblázat). A táblázat szerint bizonyos elemek hajlandók spontán ionos formába alakulni (ilyen pl. Al, Fe, Zn), bizonyos ionok viszont spontán elemmé alakulnak (ilyen pl.  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ). A hajlandóság mértékét a képződési szabadentalpia ( $\Delta G$ ) nagysága, irányát a képződési szabadentalpia előjele határozza meg, amely a hidrogén esetében definíció szerint nulla. Ez azt jelenti, hogy a felsorolt ionok képződési szabadentalpiája a hidrogénion képződésének szabadentalpiájához van viszonyítva.

Ion	$\Delta G$ (kcal/mol)
$\text{H}^+$	0
$\text{Ag}^+$	18,4
$\text{Al}^{3+}$	-115,0
$\text{Cu}^{2+}$	15,5
$\text{Fe}^{2+}$	-20,3
$\text{Zn}^{2+}$	-35,2

1. táblázat

Ha egy olyan elemet, amelynek képződési szabadentalpiája negatív a saját ionjait tartalmazó oldatba merítünk, akkor az ionos formában oldatba megy. Ez az oldatba vándorlás addig tart, amíg az elektrosztatikus vonzerő ki nem egyenlíti a szabadentalpia-különbségből származó hajtóerőt. A folyamat során felépül egy kettős réteg, és végül beáll a dinamikus egyensúly. Ezt láthatjuk a 2. ábrán.

Ugyanez igaz azokra az elemekre is, amelyek képződési szabadentalpiája pozitív előjelű, de ott elektronhiány halmozódik az elektródban és negatív ionok az elektrolitban. A kialakult egyensúly a felhalmozódott elektromos töltések vezetőkön történő elszállításában megbomlik, így az elektróda tovább oldódhat, miközben újabb elektronok, illetve elektronhiány szabadul fel. Az elektromos töltések elszállítása elektróda felől a hiányos elektróda felé történik, így áramot hoztunk létre. Hasonló jelenség játszódik le a tüzelőanyag-cella elektródjain is.



2. ábra: Kettős réteg

#### 3.2. Elektródpotenciál és standardpotenciál

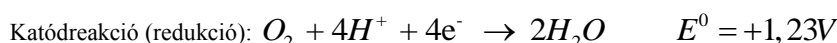
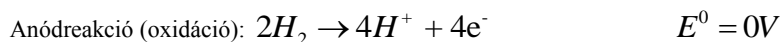
A képződési szabadentalpia helyett elektrokémiában a két elektrolitba merülő elektróda között mérhető potenciálkülönbségről beszélünk, ez az elektródpotenciál (másképpen cellafeszültség, elektromotoros erő, üresjárású feszültség). Mivel az elektródpotenciál mérhető, ellentétben a képződési szabadentalpiával. Ugyanis: 1 volt potenciálkülönbséget mérhetünk, ha a galvánelem belső ellenállása 1 ohmos és 1 amper folyik az elektródákat összekötő vezetőkön.

Ha tehát összeállítunk egy galvánelemet két különböző elektródából, akkor megmérve a köztük lévő feszültséget az elektródpotenciált kapjuk, de ez az elektródpotenciál mindig relatív, a másik elektródához viszonyított! Ahhoz, hogy felállíthassunk egy elektródpotenciál sort, szükség van egy referenciaelektróda kijelölésére. Ez a hidrogén elektróda, amely 25°C-on 1 bar nyomású hidrogén gázt, 1 mol/dm<sup>3</sup> H<sup>+</sup> iont tartalmazó oldatot és platina elektródot tartalmaz (nagyon hasonló a tüzelőanyag-cella félcellához). A hidrogén elektródából és egy másik elektródából összeállított galvánelem elektródpotenciálja a standard potenciál. Ez alapján összeállítható az elektródfolyamatok standardpotenciál sora (2. táblázat).

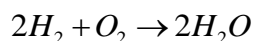
Félcella reakció	Elektródpotenciál (V)
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	0
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+0,80
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+0,34
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	-0,76
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2$	+0,68
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,77

2. táblázat

Bármely két félcella összekapcsolásával galvánelemhez jutunk, és a végbemenő cellareakciót megkapjuk, ha a két félcella reakciót leíró egyenletet megfelelően egyesítjük. Az általános működési elvek áttekintésére vegyük például egy hidrogén-oxigén betáplálású üzemanyag-cellát, melynek elektrolitja protonvezető membrán-elektrolit (PEMFC). Vizsgáljuk meg az anódon és a katódon lejátszódó reakciókat!



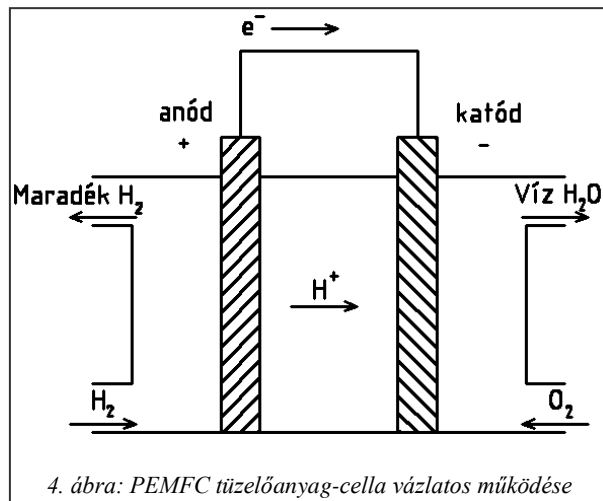
Bruttó reakció:



$$E_{cella}^0 = 1,23V$$

A katód és az anód elektróda grafitpapírból készül.  
A tüzelőanyag-cella üzemi hőmérséklete 100°C alatti.

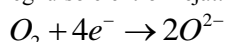
- *Az anódreakció* platina bevonatú elektródon megy végbe, amely a folyamatot katalizálja (alacsonyabb energiaszintű reakcióutat nyit meg). Működésének alapja, hogy a gáz halmazállapotú anyagok képesek a szilárd anyagok felületén adszorbeálódni. Az adszorpció során a hidrogén molekulák szétválnak, gyökök, majd ionok és szabad elektronok keletkeznek, így lehetséges az oxigén molekulákkal való reakció a katódon és az elektronok atomtörzsekről való leválasztása. Katalizátorként alkalmazható még róduim vagy ruténium, a hangsúly a jó hidrogénadszorbeáló képességen van. Az adszorpció az aktív felület növelésével javul, ezért a hidrogén és a platina elektróda érintkezési felületét porózussá kell tenni. Ezt a gyakorlatban fém/szénpor felvitelével teszik. Így viszonylag kis méretben nagy reakciófelület áll rendelkezésre (elektródatömegre vonatkoztatva akár 1000m<sup>2</sup>/g).



4. ábra: PEMFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

- *Elektrolit:* Az anódreakció során keletkezett hidrogén ionok elszállítását a protonvezető membrán-elektrolit végzi. Az elektrolit fajtája az üzemanyag-cellákban más és más, a lényeg az elektródák egymástól való elválasztása és az ionátvitel biztosítása.

- *A katódreakció* során az oxigénmolekulák gyökökre szétválva felveszik a hidrogén által leadott elektronokat, így telítve a legkülső elektronhéjat:



Ezzel létrejön az elektromos töltések áramlása az anód és a katód között. Az oxigén ionok ezután egyesülnek a hidrogénionokkal, a reakciótermék víz.



Más típusú üzemanyag-cellák esetén is hasonló reakciók játszódnak le, a különbség csak az elektrolit fajtájában, és az elektródákhoz vezetett gázokban van.

A tüzelőanyag-cellában lejátszódó reakciók a 4. ábrán követhetők nyomon.

## 5. A tüzelőanyag-cella veszteségei

Az ismertetett egy cellának az elektromotoros ereje tehát 1,23V, kapcsolófeszültsége azonban több működési jellemző miatt ennél kisebb. Ezek a működési jellemzők minden típus esetén korlátozzák a kinyerhető kapcsolófeszültséget.

### 5.1. Belső ellenállás

A cella belső ellenállása csökkenti az üresjárású feszültséget.

$$U_k = E_0 - I * R_b \text{ ahol: } U_k - \text{a cella kapcsolófeszültsége}$$

$E_0$  – a cella elektromotoros ereje  
 $I$  – a vezetõn átfolyó áram erõssége  
 $R_b$  – a cella belső ellenállása

A belső ellenállás miatt kialakuló veszteséget jelöljük  $\Delta U_{R_b}$  -vel.

### 5.2. Elektrolit ionkoncentrációja

A cellafeszültséget nagyban befolyásolja az ideális üzemeltetési körülményektõl való eltérés. Így például az elektrolit ionkoncentrációja. Ennek elektródpotenciálra gyakorolt hatása a Nernst-egyenlettel írható le:

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln c \text{ ahol: } E - \text{elektródpotenciál}$$

$E_0$  – a cella elektromotoros ereje  
 $R$  – egyetemes gázállandó  
 $T$  – abszolút hőmérséklet  
 $z$  – töltésszám  
 $F$  – Faraday-állandó

A Nernst-egyenlet tehát kapcsolatot teremt az elektródpotenciál és a koncentráció között. A Nernst-veszteség miatt kialakuló veszteséget jelöljük  $\Delta U_N$ -nel.

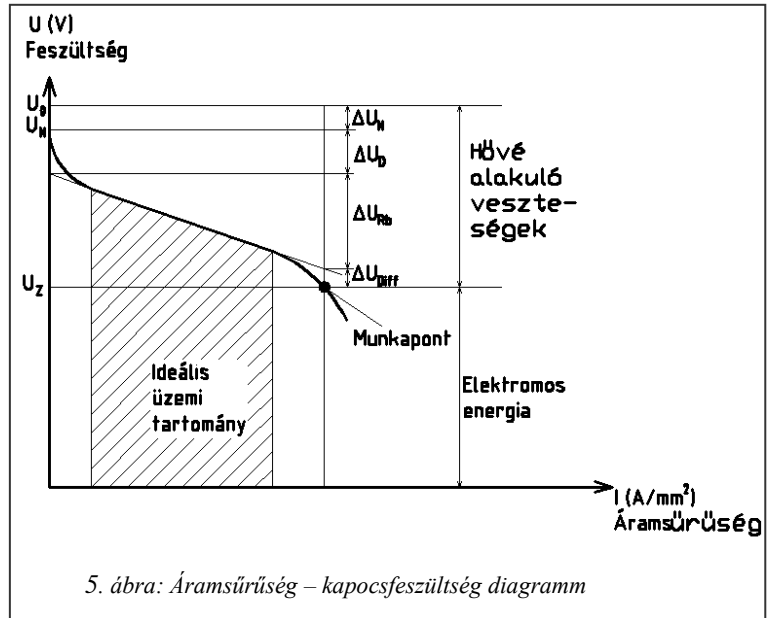
### 5.3. Elektron átlépési veszteség

Az elektróda-elektrolit határon való elektronátlépés során kialakult feszültségesés, jelöljük  $\Delta U_D$ -vel.

### 5.4. Diffúziós veszteség

A tüzelőanyag bevezetése során több gáz kerül az elektródához, mint amennyi az elektrokémiai reakció során elfogy. Ezt jelöljük  $\Delta U_{Diff}$ -fel.

Mindezeket figyelembe véve a kapocsfeszültség ( $U_z$ ) megközelítően 0,8V-ra adódik. A gyakorlatban a nagyobb feszültség elérését több cella sorba kapcsolásával oldják meg. A felsorolt veszteségeket ábrázoljuk áramsűrűség-feszültség diagrammban az 5. ábrán.



5. ábra: Áramsűrűség – kapocsfeszültség diagramm

A kapocsfeszültség tovább csökken terhelő ellenállások közbeiktatásával (ugyanúgy, mint minden telep, akkumulátor esetén):

$$U_k' = U_k - I \cdot R_t \text{ ahol: } U_k - \text{a cella kapocsfeszültsége}$$

$I$  – a vezetõn átfolyó áram erõssége  
 $R_k$  – a terhelõ ellenállás

## 6. A tüzelőanyag-cella hatásfoka

Az tüzelőanyag-cella összh hatásfoka az alábbi képlettel számítható:

$$\eta_{\sigma} = \eta_{th} + \eta_E + \eta_F \text{ ahol: } \eta_{\sigma} - \text{összh hatásfok}$$

$\eta_{th}$  - termodinamikus hatásfok

$\eta_E$  - elektromos hatásfok

$\eta_F$  - Faraday -hatásfok

A felsorolt hatásfokok magyarázata:

**Termodinamikus hatásfok ( $\eta_{th}$ ):**

Megmutatja milyen arányban áll egymással a bevitt kémiai és a kinyerhető villamos energia. Értéke néhány gázra:

hidrogén  $\eta_{th} = 94\%$

metán  $\eta_{th} = 100\%$

szénmonoxid  $\eta_{th} = 91\%$

**Elektromos hatásfok ( $\eta_E$ ):**

Az elméleti kapocsfeszültség (1,23V) és a feszültség veszteségek figyelembevételével kapott kapocsfeszültség hányadosa

$$(U_z): \eta_E = \frac{U_z}{E_0}$$

**Faraday-hatásfok ( $\eta_F$ ):**

Más néven átalakítási hatásfok, megmutatja az átalakított és a bevezetett tüzelőanyag tömegarányát.

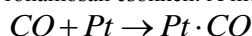
$$\eta_F = \frac{m_{\text{átalakított}}}{m_{\text{bevezetett}}}$$

Az így kiszámított hatásfokértékek az egyes tüzelőanyag-celláknál különböznek, de általában elmondható, hogy 55 és 70% közé esnek.

## 7. Néhány alapvető probléma tüzelőanyag-cellák esetén

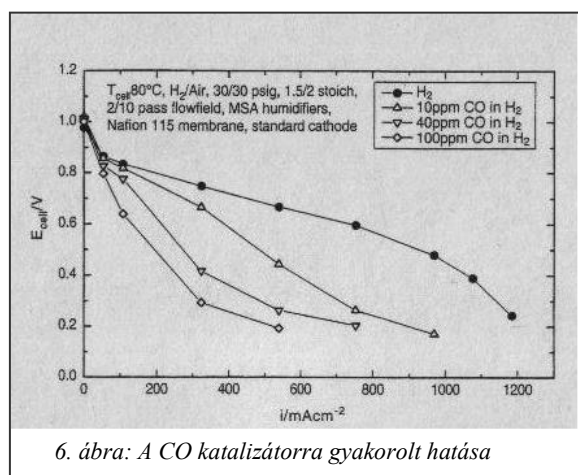
### 7.1. A platina katalizátor szénmonoxid „mérgezése”

A tüzelőanyag-cellában fennáll az anód oldali elektróda platina bevonatának szénmonoxid általi szennyeződése. A fosszilis tüzelőanyagokból a reformeljárás során nem kellő tisztaságban kinyert hidrogénben lévő szénmonoxid befedi a platina katalizátor felületét, ezzel csökken az aktív felület. Az ebből adódó áramsűrűség, és hasznos teljesítmény csökkenés jelentős, hiszen az előzőekben bemutatott Faraday-hatásfok rohamosan csökken. A mérgeződés reakcióegyenlete:



A szénmonoxid mérgezés kapocsfeszültségre gyakorolt hatása látható az áramerősség függvényében a 6. ábrán. Az ábrából kiolvasható, hogy nagy áramsűrűség esetén nagymértékben lecsökken a kapocsfeszültség, hozzávetőlegesen 80%-kal. Az is látható, hogy azonos áramsűrűség értékekhez tartozó kapocsfeszültségek a hidrogén szénmonoxid tartalmának függvényében már kis szénmonoxid tartalom esetén is jelentősen csökkennek. Ha a platina katalizátor helyett platina-ruténium bevonatot alkalmaznak, akkor a szénmonoxid hatása jelentősen csökkenhet, mert a platina-ruténium kevésbé lerakódás érzékeny.

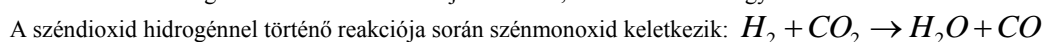
A lerakódásveszély csökkenthető az üzemi hőmérséklet emelésével is, ám ez okozhatja az elektrolit-membrán kiszáradását PEMFC esetén.



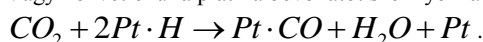
6. ábra: A CO katalizátorra gyakorolt hatása

### 7.2. A platina katalizátor széndioxid mérgezése (7. ábra)

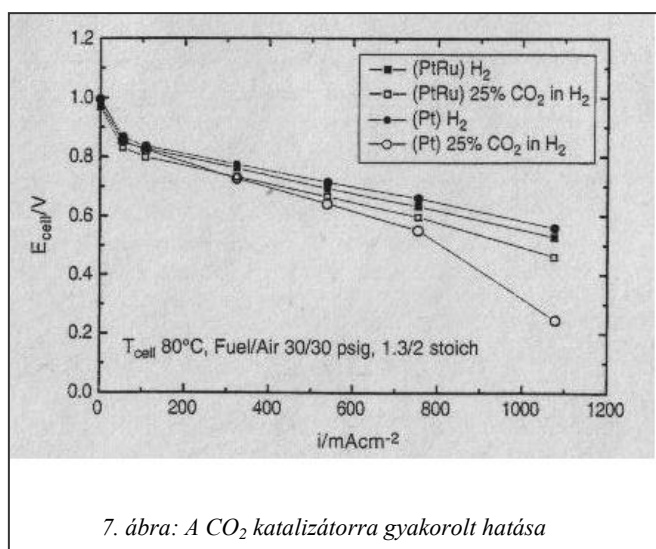
A szénmonoxid mérgezéshez hasonló módon játszódik le, az alábbi reakcióegyenletek szerint:



Vagy közvetlenül a platina bevonatot szennyezi a felületen adszorbeálódott hidrogén közrehatásával:



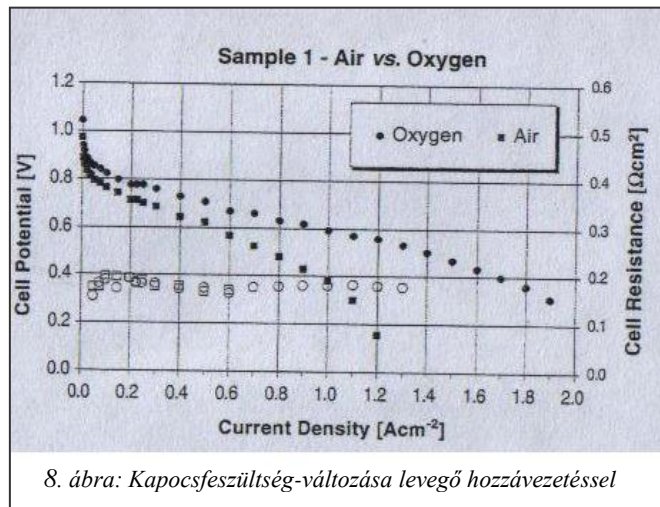
A 7. ábra széndioxid hatását mutatja platina és platina-ruténium katalizátorra. Látható, hogy a platina-ruténium katalizátor ellentétben a platina katalizátorral sokkal kevésbé lerakódás érzékeny, a felső két görbe szinte párhuzamosan halad egymástól kis távolságra, azaz kis feszültségkülönbséggel, míg a platina katalizátorra 25% széndioxid tartalmú gázt vezetve nagy áramsűrűség esetén 80%-os feszültség visszaesést tapasztalunk.



7. ábra: A CO<sub>2</sub> katalizátorra gyakorolt hatása

7.3. A tüzelőanyag-cella kapcsolófeszültség-változása a katód levegő hozzavezetése esetén (8. ábra):

A korábban felvázolt áramsűrűség-feszültség diagramhoz képest a levegő betáplálású tüzelőanyag cella áramsűrűség-feszültség diagramja nagyobb esésű, és nem is ér el akkora maximumot. Az aktuális áramsűrűség legnagyobb értékeihez közeledve a kapcsolófeszültségek közötti különbség jelentőssé válik, levegő betáplálás esetén 50-70%-kal esik vissza. A kapcsolófeszültséggel ellentétben az ohmos ellenállás nem mutat jelentős eltérést az oxigén és levegő bevezetése esetén.



8. ábra: Kapocsfeszültség-változása levegő hozzavezetéssel

7.4. A protonvezető membrán-elektrolitos tüzelőanyag cellák (PEMFC) membránnedvességi problémája

A membrán ionvezetése a nedvességétől nagyban függ. A membrán egyik összetevőjének vízzel történő érintkezésekor lezajló disszociációja következtében a membrán savas karakterűvé válik, így a pozitív töltésű hidrogén atomtörzsek (protonok) számára vezetőként viselkedik. Ha azonban a membrán kiszárad, akkor a disszociáció nem jön létre, és a protonvezetés leáll.

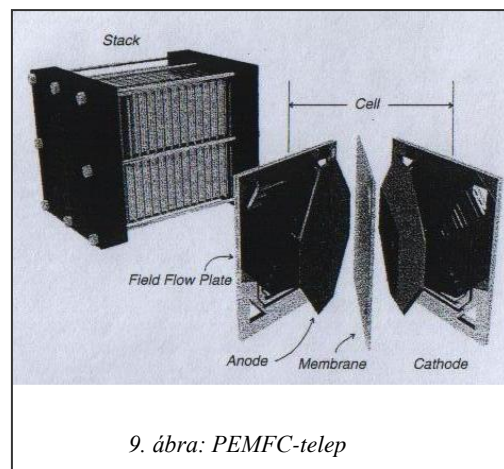
## 8. PEMFC telep (stack) kialakítása tüzelőanyag-cellákból

Több tüzelőanyag-cella elektromos összekapcsolásával kapjuk az úgynevezett „stack”-et, vagy telepet. Az összekapcsolás lehet soros vagy párhuzamos, attól függően, hogy nagyobb kapocsfeszültséget, illetve nagyobb áramerősséget akarunk elérni. A gyakorlatban soros kapcsolású cellákat alkalmaznak, így jön létre a 9. ábrán látható telep.

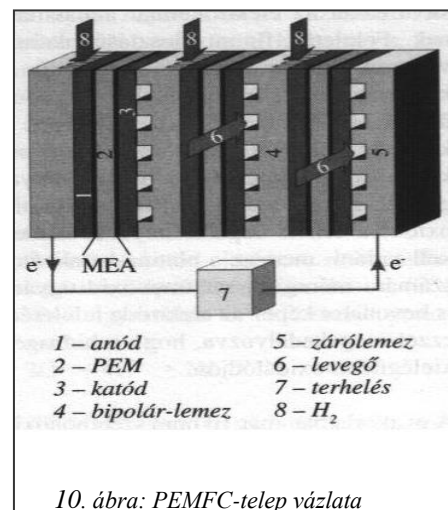
A sorba kapcsolt cellák száma függ az elvárt kapocsfeszültségtől, felületük pedig az elvárt áramerősségtől, mivel egy cella csak adott áramsűrűséget képes biztosítani. Minden egyes tüzelőanyag-cella kivételről függően terhelés alatti feszültsége 0,7 V maximális feszültsége pedig 1,2 V. A 10. ábrán látható egy PEMFC-telep robbantott ábrája.

Az egyes tüzelőanyag cellákat egymástól bipolar lemezek választják el, illetve kapcsolják őket sorba elektromosan. A bipolar lemezek feladata kettős: egyrészt elektromos összeköttetést biztosítanak az egyik cella katódja és a szomszédos cella anódja között, másrészt a bennük lévő csatornarendszer kialakítása lehetővé teszi az egyes cellák párhuzamos tüzelőanyaggal való ellátását. A 10. ábrán látható, hogy a hidrogén függőleges furatokon áramlik az anódhoz, az oxigén pedig vízszintes furatokon jut el a katódhoz minden egyes bipolar lemez esetén. A jó vezetőképesség elérése érdekében a bipolar lemezek grafitból készülnek. Ez az anyag jól alakítható, így nem okoz nehézséget a kereszt-és hosszirányú furatok kialakítása sem. Ezen kívül sűrűsége kicsi, így nem okoz vagy járulékos tömegnövekedést a telepekben. Hátrányos tulajdonsága viszont, hogy elállítása nagyon drága, egy tüzelőanyag cella költségének körülbelül felét teszi ki. Másik előnytelen tulajdonsága a törékenysége, ami így megnehezíti a telep összeszerelését. Felhasználási méretét tekintve néhány mm vastagság elegendő, mert a grafit porózus anyag, és a hangsúly a reagens tüzelőanyagok egymástól való elválasztásán van.

Tekintsük át a főbb bipolar lemez típusokat!



9. ábra: PEMFC-telep



10. ábra: PEMFC-telep vázolata



### 8.1. Fémfólia alapú bipolar lemez

A fémfólia alapú bipolar lemezek nagy előnye az alacsony gyártási költség és jó alakíthatóság. Vékony fémfóliából készül, de így nem nyújt megfelelő védelmet a korrózió ellen. Ennek megoldása lehetséges korróziógátló bevonatok, rétegek felvitelével a lemezre, de ez jelentősen megnöveli a gyártási költségeket. Ma még folynak az ez irányú fejlesztések.

### 8.2. Grafitos bipolar lemez

A PEMFC tüzelőanyag-cella üzemi hőmérséklet-tartományában a grafit stabil. 500°C-ig nagyon jó hő és elektromos vezetőképességgel rendelkezik. Más anyagokkal való kompozitképzéssel a grafit szilárdsági tulajdonságai is javíthatók, így a grafit bipolar lemezek az alábbi anyagokból készülhetnek:

- szinter grafit, melynek pórusait folyékony műgyantával töltik ki. A gyanta kikeményedése után a kompozit bipolar lemezzé alakítható

- grafit-műanyag keverék, amely grafitpor és termoplaszt illetve duroplaszt keverékéből áll

- natúr grafitfólia, amelyet több lépcsős hengerléssel állítanak elő. A vékony nagy porozitású lemezek gyanta bevonatot kapnak, amely a mechanikai szilárdságot javítja.

A bipolar lemezek gázbevezetését különböző gyártók eltérő módon oldják meg, de a lényeg a reagens anyagok egymástól való elválasztása.

Összegzőként elmondható a PEMFC-telepekről, hogy gépjárműves alkalmazásra a tüzelőanyag-cella változatok közül messze a legalkalmasabb, mert nagyon rövid az előmelegítési idő szükséglete, dinamikus és hirtelen terhelésváltozásokhoz jól alkalmazkodik. Háztartási energiaellátásban is jól használható, decentralizált energiaellátásban nagy szerepet vállalhat a jövőben.

## 9. Egyéb tüzelőanyag-cella típusok

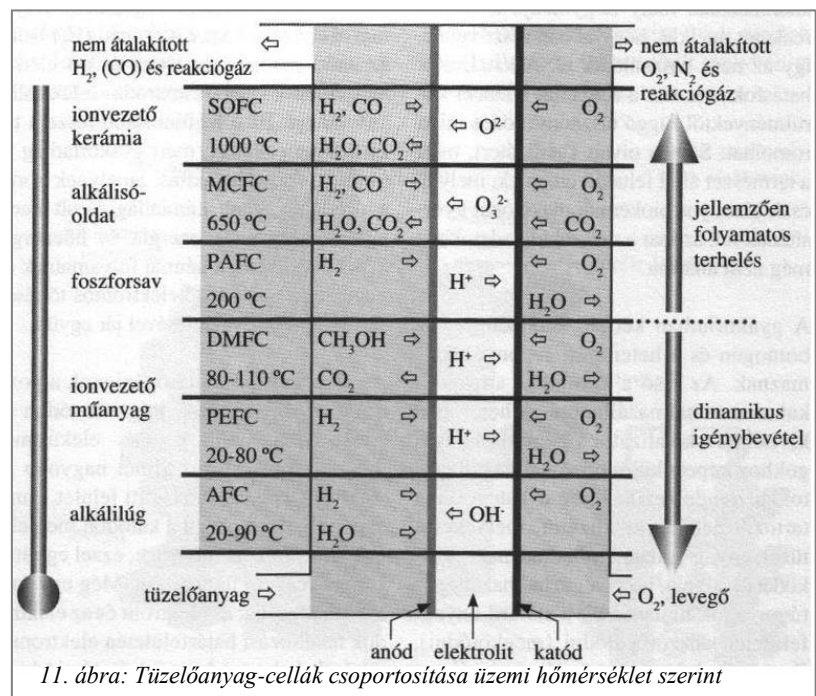
A tüzelőanyag-cella típusok több szempont szerint rendszerezhetők:

Üzemi hőmérséklet szerint megkülönböztetünk alacsony és magas hőmérsékletű típusokat. Az üzemi hőmérséklet szerinti csoportosítás látható a 11. ábrán.

Üzemi nyomás szerint nagynyomású, közepes- és kisnyomású (atmoszférikus nyomású) típusokat.

Az alkalmazott elektrolit szerinti felosztás a leggyakoribb:

- PEMFC (Proton Exchange Membran Fuel Cell): protonvezető membrán-elektrolitos tüzelőanyag-cella
- AFC (Alkaline Fuel Cell): Alkális oldatos tüzelőanyag-cella
- DMFC (Direct metanol Fuel Cell): Direkt metanol tüzelőanyag-cella
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell): Foszforsavas tüzelőanyag-cella
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell): Magas hőmérsékletű kerámia-oxid alapú tüzelőanyag-cella



Az egyes tüzelőanyag-cella típusok rövid ismertetése során megvizsgáljuk működésüket és lehetséges alkalmazási területeiket.

11. ábra: Tüzelőanyag-cellák csoportosítása üzemi hőmérséklet szerint

### 9.1. AFC (Alkaline Fuel Cell): Alkálisó oldatos tüzelőanyag-cella

Az AFC a legrégebbi képviselője a tüzelőanyag-cella technológiának. Az elektrolit 30-45%-os változtatható koncentrációjú kálium (KOH). Ez a fajta elektrolit hidroxidion ( $\text{OH}^-$ ) vezető. A hidroxid ionok a katódon képződnek és az elektroliton keresztül vándorolnak az anódhoz, ahol a hidrogénnel kémiai reakcióba lépnek.

Első anódreakció:  $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Első katódreakció:  $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$

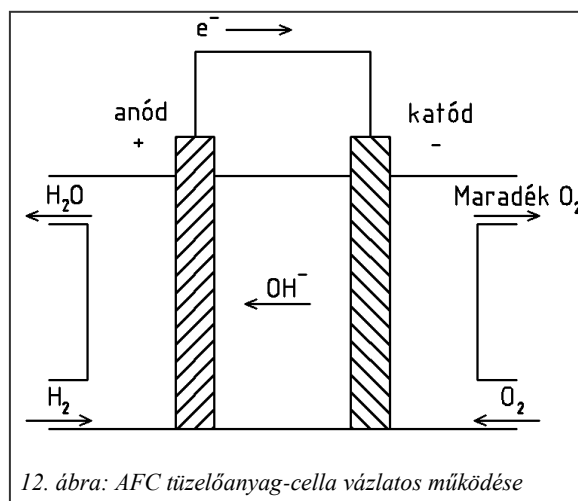
Második katódreakció  $2\text{O}^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{OH}^-$

A hidroxid ionokat az elektrolit az anódhoz továbbítja

Második anódreakció:  $4\text{H}^+ + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}$

A különbség tehát a már részletesen bemutatott PEMFC tüzelőanyag-cellához képest, hogy az elektrolitban  $\text{OH}^-$  ionok áramlanak, és ellentétes irányban. Ezt láthatjuk a 12. ábrán.

Az AFC üzemi hőmérséklete 60-90°C, alacsony. Az elektródák nikkel-platina bevonatúak. Nagyon érzékeny  $\text{CO}_2$ -mérgezésre, ezért csak nagy tisztaságú gázokkal üzemeltethető. Űrhajókon és tengeralattjárókon alkalmazzák. Hatásfoka 60%.



12. ábra: AFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

### 9.2. DMFC (Direct metanol Fuel Cell): Direkt metanol tüzelőanyag-cella

A DMFC tüzelőanyag-cella folyékony metanolból állít elő elektromos és hőenergiát.

Első anódreakció:  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$

Második anódreakció:  $3\text{H}_2 \rightarrow 6\text{e}^- + 6\text{H}^+$

A protonokat az elektrolit a katódhoz továbbítja

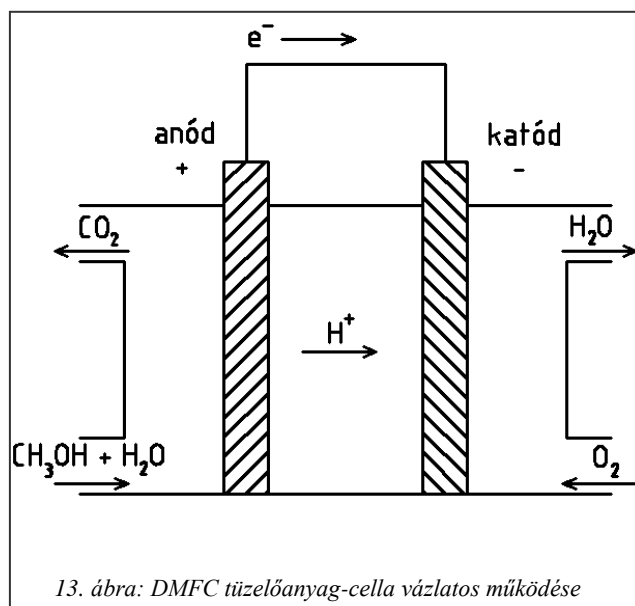
Első katódreakció:  $3/2\text{O}_2 + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{O}^{2-}$

Második katódreakció:  $3\text{O}^{2-} + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$

A DMFC tulajdonképpen a PEMFC egyik variánsa, a különbség csak abban áll, hogy hidrogén helyett vizet és metanolt vezetünk az anódhoz. Problémaként jelentkezik a metanol bejutása az elektrolitba. Ilyen esetben a protonokkal reakcióba lép, és csökkenti a cella összhatásfokát. Ezért az elektroliton palládium záróréteget alakítanak ki, amely csak a protonokat engedi át.

A DMFC üzemi hőmérséklete 100-130°C, üzemi nyomása 1,5-4 bar. Az elektródák platina-palládium bevonatúak ( $\text{CO}_2$  mérgezés elkerülése). Fontos a metanol-víz összetétel pontos beállítása, mert túl alacsony metanol koncentráció esetén kevés hidrogén kötődik meg, túl nagy koncentráció esetén viszont a már említett elektrolit szennyeződés következik be. A megfelelő arány körülbelül 1:1. Az üzemi hőmérséklet beállítása is fontos, mert alacsony hőmérsékleten a reakciók lassan játszódnak le, magas hőmérsékleten viszont a protonvezető membrán-elektrolit kiszárad. Az üzemi nyomás 1 barral történő emelése 20mV-tal növeli a cellafeszültséget. A metanol bevezetése folyékony halmazállapotban ideális.

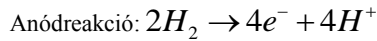
Alkalmazása főleg kis teljesítményű hordozható eszközökben lehetséges, például számítógépekben.



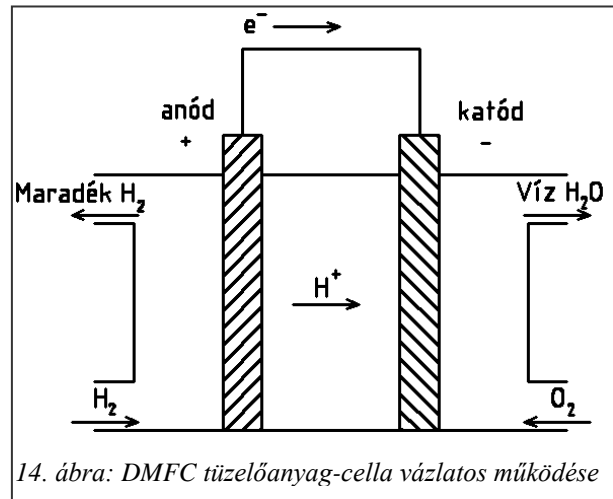
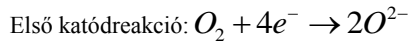
13. ábra: DMFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

### 9.3. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell): Foszforsavas tüzelőanyag-cella

A PAFC működése szintén nagyon hasonló a PEMFC-hoz. Hidrogént és oxigént használ. Elektrolitként magas koncentrációjú vízmentes foszforsavat alkalmaznak, amellyel a széndioxid nem képes reakcióba lépni, így lehetővé válik fosszilis tüzelőanyagokból reformeljárás során kinyert kis széndioxid tartalmú hidrogén bevezetése is. A végbemenő reakciók:



A protonokat az elektrolit a katódhoz továbbítja

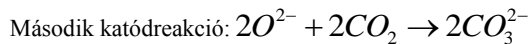
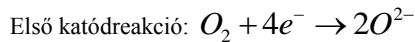


14. ábra: DMFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

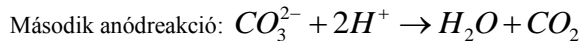
A PAFC tüzelőanyag cella hatásfoka alacsony, mindössze 40%, viszont a többi típushoz képest fejlesztése sokkal előrehaladottabb. Üzemi hőmérséklet és nyomás növelésével a cellafeszültség is nő. Teljesítménye 200 kW-tól akár 10 MW is lehet, ezért hőerőművekben alkalmazható (például Tokióban 11 MW-os PAFC).

### 9.4. MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella

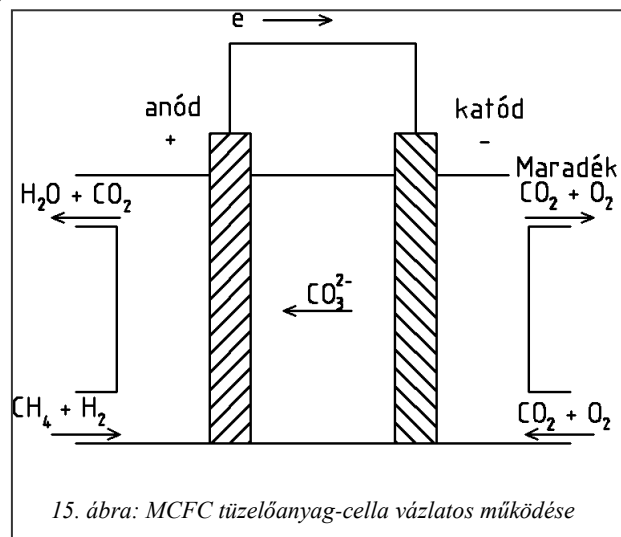
Elektrolitja olvadék állapotú alkáli karbonát, például  $Li_2CO_3$ , vagy  $K_2CO_3$ . Az ionvezetés karbonát ionokkal történik. Az anódhoz hidrogén vagy metán vezethető, a katódhoz oxigén és széndioxid hozzávezetésre van szükség, mert a széndioxiddal biztosított az oxigén karbonát ionokká való alakulása, amely így már szabadon áramolhat az elektrolitban. A karbonát ionok áramlási iránya tehát a katód felől az anód felé tart (ld. 15. ábra).



A karbonát ionokat az elektrolit az anódhoz továbbítja



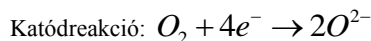
Az MCFC magas üzemi hőmérséklete 650°C-on működik. Tüzelőanyagként biogáz és földgáz is használható. Ahhoz, hogy a karbonát-kör fennmaradjon az anódon képződő széndioxidot, vizgőzt és metán maradványokat levegő hozzákeverésével egy égetőtérbe vezetik, ahonnan a forró széndioxidot, vizgőzt és levegőt a katódra juttatják. Hatásfoka 60%-os, hőerőművekben, villamos erőművekben használható. Maximális teljesítménye 500 kW.



15. ábra: MCFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

### 9.5. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell): Magas hőmérsékletű kerámia-oxid alapú tüzelőanyag-cella

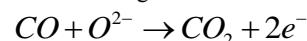
A cella elektrolitja yttrium-oxiddal ( $Y_2O_3$ ) stabilizált cirkónium-oxid. Ez csak magas hőmérsékleten válik ionvezetővé, ezért a cella üzemi hőmérséklete  $1000^\circ C$  körüli. Az elektrolit oxigén ionokat vezet a katódról az anódra a 16. ábrán látható módon. Tüzelőanyagai az MCFC-vel megegyeznek, de nincs szükség feltétlen hidrogén alkalmazására, bármilyen oxidálható tüzelőanyag megfelel, ez nagy előny a többi típussal szemben. Ezen kívül ellentétben a korábban bemutatott tüzelőanyag-cellákkal az MCFC magas üzemi hőmérséklete miatt szénmonoxid és széndioxid mérgezés nem lép fel. A lejátszódó reakciók:



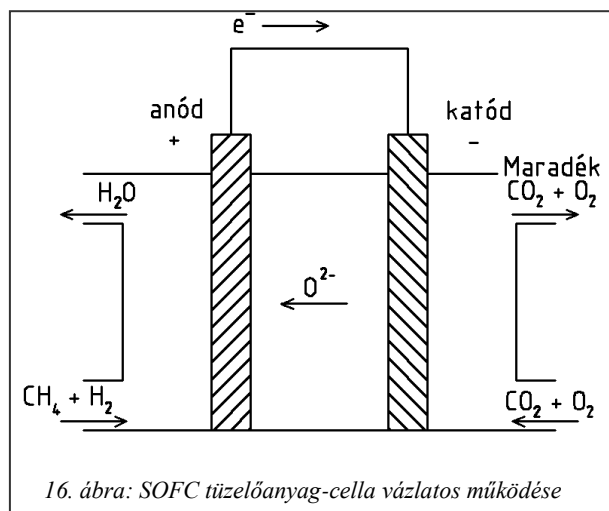
Az oxigén ionokat az elektrolit az anódhoz továbbítja



Az anódhoz vezethető szénmonoxid is, ebben az esetben a hidrogén helyett a szénmonoxiddal lép reakcióba a katódról származó oxigénion az alábbi reakcióegyenlet szerint:



A SOFC tüzelőanyag-cella hatásfoka nagyon kedvező 55-70%-os, hőerőművekben villamos erőművekben és háztartásokban is alkalmazható. Teljesítménye néhány kW-tól több száz kW-ig terjed.



16. ábra: SOFC tüzelőanyag-cella vázlatos működése

Összegzésként elmondható, hogy a tüzelőanyag-cellák tulajdonságai, mint a magas hatásfok, alacsony károsanyag kibocsátás fejlesztése néhány Watt-tól több száz kW-ig nagy ráfordításokkal folyik. Alkalmazási területe nagyon széleskörű, a gépjárműves lehetőségek mellett a mobil és stacioner üzemben is használható. A fejlesztési munkák során kialakul, hogy milyen területen alkalmazott tüzelőanyag-cellákhoz milyen hajtóanyag optimális.

Átfogó tanulmányok szerint a hosszútávú tüzelőanyag cellás hajtás legígéretesebb anyaga a hidrogén, azonban ennek nagy tisztaságú előállítás és tárolása nehézségekbe ütközik. Jelenleg az üzemanyag cellák elterjedését leginkább gátló tényező a hidrogén-töltő állomások nem megléte és a hidrogéntárolás megoldatlansága, valamint a jelenleg csak reformeljárás során előállítható hidrogén tisztasága.

Stacioner üzemben a tüzelőanyag-cella új lehetőséget nyit a decentralizált energiaellátás kiépítésében.

Mobil berendezések esetén lényegesen hosszabb üzemidőt tesz lehetővé.

## 10. Néhány jelenlegi alkalmazás, kutatás

### 10.1. Az Opel PEMFC tüzelőanyag-cellás prototípusa

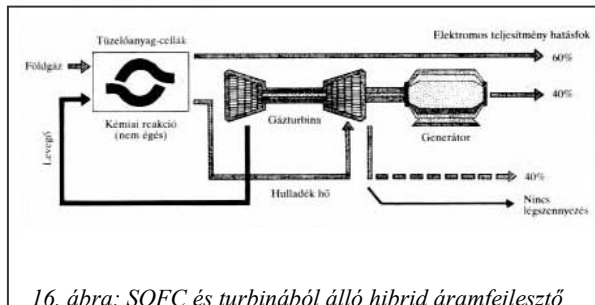
Az Opel 2004-ben bemutatta első üzemképes, tüzelőanyag-cellás autóját, amely a Zafirán alapul, és PEMFC-típusú tüzelőanyag-cellát alkalmaz. Ami a tömeggyártást illeti, az Opel a tüzelőanyag-cella és az elektromos hajtás kombinációjában lát minden egyéb alternatív hajtási rendszerénél nagyobb lehetőséget. A korszerű belsőégésű motorokkal összehasonlítva a tüzelőanyag-cellának sokkal jobb a hatásfoka, kén-dioxid ( $SO_2$ ) és nitrogén-oxid ( $NO_x$ ) kibocsátása pedig közel nulla. A széndioxid ( $CO_2$ ) kibocsátás csaknem megfelelődik. Drága és sok helyet foglaló speciális hidrogéntartályok helyett a jármű metilalkoholtal vizet magával, hagyományos tüzelőanyag-tartályban. A prototípusban tüzelőanyag-átalakító rendszer állít elő metanolból hidrogénben dús gázt. A melléktermék szén-dioxid. A folyamatban keletkező kis mennyiségű szén-monoxidot katalizátor oxidálja szén-dioxiddá, mielőtt a gázt bevezetnék a tüzelőanyag-cellákba. A tüzelőanyag-cella jó energiaátalakítási hatásfokának köszönhetően ez a hajtási mód kiegyenlíti a metilalkoholnak a gázolajhoz viszonyított kisebb energiasűrűségét. A jármű hatótávolsága ennél fogva hasonló a hagyományos hajtású autókéhoz. Egy cella 0.7-0.9 voltos feszültséget kelt, a sorba kapcsolt cellák telepet képeznek. A fejlesztett villanyáram 50 kilowattos váltóáramú motort táplál, amely egyfokozatú áttételen keresztül hajtja az első kerekeket.

### 10.2. Hidrogén biztosítása tüzelőanyag-cella előtti reformrendszerrel

Az előző pontban említett Opel prototípus metanolból nyert reformeljárással hidrogént. Lehetőség van azonban közvetlenül benzinből is hidrogén kinyerésére. Egy különleges üzemanyag-feldolgozó rendszer az üzemanyag részleges oxidálásával hidrogént termel. Ebből a hidrogénből tüzelőanyag-cellában már közvetlenül megtermelhető annyi villamos áram, amely akár egy közepes kategóriájú villanyautónak a folyamatos üzemben tartásához is elegendő. Nincs tehát szükség sem nagy terjedelmű és nehéz akkumulátorokra, sem pedig a feltöltésükhöz szükséges drága „áramtankolási” infrastruktúrára. A hidrogént előállító üzemanyag-feldolgozó egység a laboratóriumi kísérletekben benzinnel és etil-alkohollal működött, de metil-alkohollal vagy földgázzal is üzemeltethető.

### 10.3. Gázturbinával kombinált áramfejlesztés

Az elektromos teljesítmények s egyúttal a hatásfokok maximalizálására az áramfejlesztők a hőerőművektől az atomerőművekig az úgynevezett kombinált ciklusok módszerét alkalmazzák. A tüzelőanyag-cellás áramtermelést is kifizetődő más áramtermelő móddal kombinálni, például a szilárd oxidos tüzelőanyag-cellához gázturbinát adni (a SOFC üzemi hőmérséklete 1000°C körüli). A kombináció azért előnyös, mert egyszerre két problémát is megold: növeli a hatásfokot és nem lép fel a kis gázturbinák önálló használatakor keletkező viszonylag sok nitrogén-oxid. A kis, 10 MW-osnál kisebb gázturbinák hatásfoktartománya 25-30%. A kombinált rendszer teljesítmény-beruházási költség arányát tekintve is előnyös. Úgy vélik, hogy a kombinált rendszer teljesítményre számított beruházási költsége jóval alacsonyabb lesz, nagyjából annyi, mint az önálló, kisebb hatásfokú gázturbinás erőművéké. A vázolt hibrid rendszerben, amelyben a tüzelőanyag-cellák égőkamraként működnek, amennyiben biztosítják a plusz elektromos energiát termelő turbina meghajtásához szükséges forró gázáramot, a tüzelőanyag elektromos energiává alakításának hatásfoka még az 1 MW-osnál kisebb méretben is 60% fölé emelkedik. Ez jóval magasabb, mint bármely más (azonos méretű)



16. ábra: SOFC és turbinából álló hibrid áramfejlesztő

elektromosenergia-termelő rendszer hatásfoka (17. ábra). Nagyobb rendszerekkel – a 100–400 MW-os tartományban – 75% feletti hatásfok érhető el. Viszont míg az ebbe a teljesítménytartományba tartozó gázturbinák kereskedelmi forgalomban kaphatók, az ekkora erőművekhez szükséges tüzelőanyag-cellákat valószínűleg csak egy-két évtized múlva lesznek képesek gyártani. Pillanatnyilag a kis, vagy mikrotüzelőanyag-cellákból és gázturbinákból álló rendszerek kutatása-fejlesztése folyik.

## 11. Felhasznált irodalom

1. Dr. Emőd István – Tölgyesi Zoltán – Zöldy Máté: *Alternatív járműhajtások*
2. Gregor Hoogers: *Fuel Cell Technology*
3. <http://www.sulinet.hu/eletestudomany/archiv/1998/9805/jovo/jovo.html>
4. <http://www.gjt.bme.hu/sajtotaj/opel/opel-6/Opel-6.html>
5. <http://www.kfki.hu/chemonet/hun/olvaso/kemia/tc.html>
6. <http://www.fuelcell.hu/fuelcells.php>
7. <http://www.matud.iif.hu/02dec/olah.html>