

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET

HIDROGÉNTERMELÉS, JOGSZABÁLYOK, FENNTARTHATÓSÁG, AVAGY MILYEN ÚT VEZET EGY HIDROGÉN HAJTOTTA ZÖLD JÖVŐ FELÉ

KÉSZÍTETTE:

Molnár Zsófia

NEPTUN KÓD:

A8DFAE

BSc. Gépészmérnök

Vegyipari Gépészeti Specializáció

TERVEZÉSVEZETŐ:

Dr. Szamosi Zoltán

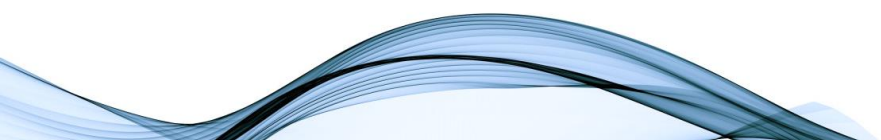
egyetemi docens

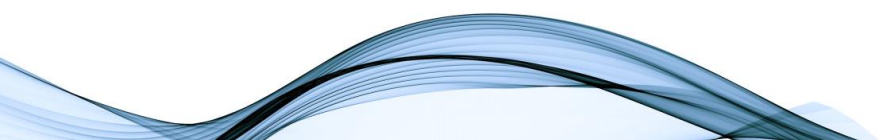
KONZULENS:

Dr. Petrik Máté

adjunktus

Miskolc, 2023





Tartalomtalmomjegyzék

1	Bevezetés	5
2	Introduction	7
3	A hidrogén fajtái	8
4	Hidrogén előállítása metánból	9
4.1	Gőzreformálással	9
4.2	Pirolízissel	11
4.2.1	Technológiai fejlesztés	11
4.2.2	Metán pirolízis modell fejlesztése	12
4.3	Kicsit a PSA-ról	14
4.3.1	Általánosságban	14
4.3.2	A folyamat – elválasztás adszorpcióval	14
4.3.3	A folyamat – adszorpció és regenerálás	15
4.3.4	Alkalmazása Magyarországon	16
5	Üzemanyag-cella	16
5.1	Mi az az üzemanyag-cella?	16
5.2	Hogyan működik?	18
5.3	Tudományosabb megközelítésből	18
5.3.1	Képződési szabadentalpia	19
5.3.2	Elektródpotenciál és standardpotenciál	20
5.4	Az üzemanyag-cella fejlesztésének magyar vonatkozása	23
5.5	Üzemanyag-cella típusainak bemutatása és csoportosítása	24
6	A hidrogénelőállításra vonatkozó jogszabályok	30

6.1	Jogszabályi háttér	32
6.2	Megállapítások	32
7	Üzemanyag-cella számokban.....	35
7.1	Mennyi hidrogénre van szükség egy üzemanyag-cella működtetéséhez	35
7.1.1	Mire elég egy gallon üzemanyag és mennyi vizet termel?	36
7.1.2	Mire használható ez a víz?	37
8	Fenntartható hidrogén előállítás.....	37
8.1	Mi az az elektrolízis?	38
8.2	Hogyan Működik egy elektrolizáló?	38
8.3	Elektrolizáló típusok	38
8.3.1	Elektrolizálók hatásfoka.....	40
8.3.2	Rekordot döntő hatásfok.....	41
8.3.3	Elektrolizáló áramszükséglete.....	41
8.4	Regeneratív üzemanyag-cellák	43
8.5	Zöldhidrogén üzem.....	44
8.5.1	Mennyi napenergiára van szükség?	44
8.5.2	Hogyan működik egy zöldhidrogén üzem?	46
9	Befejezés.....	47
10	Conclusion.....	51
	Irodalomjegyzék.....	55
	EREDETISÉGI NYILATKOZAT	63

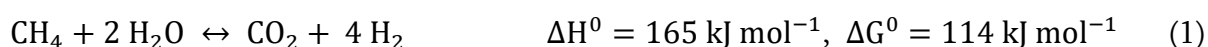
1 Bevezetés

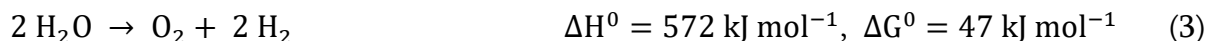
A Földön a hidrogén jelen van a vízben, a biomasszában és szinte valamennyi szerves vegyületben. A hidrogén nem energiaforrás, hanem másodlagos energiahordozó, amelyet nem lehet közvetlenül kitermelni, csak valamilyen egyéb energiahordozó felhasználásával előállítani (MHT egyesület). A hidrogén többféle eljárással és energiaforrásból állítható elő.

A fosszilis szénhidrogének hatalmas tárolt kémiai potenciállal rendelkeznek, az őskori fotoszintetikus folyamatokból. Az emberiség világszerte gyarapodott, széles körű elérhetőségük és viszonylag alacsony költségük miatt. Jelenleg évente körülbelül 10 billió kilogramm szénét égetünk el olcsó fosszilis tüzelőanyagként. Felhasználásukat azonban korlátozza az a tény, hogy véges erőforrásról van szó. A megnövekedett CO₂ kibocsátás elfogadhatatlan környezetkárosító hatásokkal jár. Ez az egyre nagyobb méreteket öltő probléma azonban a közeljövőben, – még mielőtt az árak a kimerülés miatt megemelkednének –, a társadalmat olyan alternatívák felé terelheti, amelyek képesek biztosítani a tartós emberi jólétet[1]. Óriási kihívást jelent, a nagy mennyiségű szén-dioxid kibocsátással járó folyamatokról, fenntarthatóbb alternatívákra átállni. Ahhoz, hogy ezt megvalósíthassuk, évtizedeken és nemzedékeken átívelő, hatalmas projektekre és beruházásokra van szükség[2].

A fosszilis erőforrások közül, a földgázban lévő metán adja a legtöbb energiát a megtermelt szén-dioxid tömegegységére vonatkoztatva, és potenciálisan a legnagyobb fosszilis tartalék (ha a hidrátokat is beleszámítjuk)[3]. A szén metánnal való helyettesítése jelentős kibocsátáscsökkentést eredményezne. Hosszú távon azonban elkerülhetetlen az olyan üzemanyagokra való átállás, amelyek nem termelnek CO₂-t. Vegyük például a hidrogént. Tisztán ég, csak vizet termel és felhasználható üzemanyagcellákban. Régóta esélyes arra, hogy a jövő egyik fő üzemanyagává váljon. Napjainkban, globálisan a hidrogén 96%-át fosszilis tüzelőanyag-reformálási technológiákkal állítják elő (1. és 2. egyenlet)[2]. A fennmaradó 4%-ot pedig elektrolízissel, amely során a vizet elektromos árammal osztják fel, így a folyamat potenciálisan CO₂-mentes (3. egyenlet).

A legelterjedtebb szénhidrogén alapú hidrogén-előállítási technológia a gőz-metán reformálás (SMR), amely a globális kereslet mintegy 48%-át elégíti ki. Az SMR-folyamat során nagynyomású gőz (H₂O) reagál földgázzal (CH₄), miközben hidrogént (H₂) és CO₂-t termel[4].

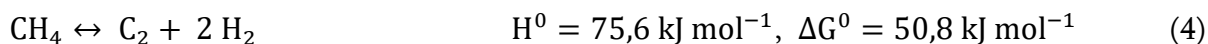




Egy tipikus SMR hidrogénüzem körülbelül 9–10 tonna CO_2 -egyenértéket termel tonnánként[5]. Ezzel szemben, ha a hidrogént szénelgázosítással állítanák elő (jelenleg a globális H_2 -termelés 18%-a), a hidrogéntermékek tonnánkénti CO_2 -kibocsátása megkétszereződne az SMR-hez képest. Ez egyszerűen szólva azt jelenti, hogy a mai fosszilis alapú technológiával előállított hidrogénnek, mint üzemanyagnak, csökken az értéke egy szén-dioxid-kibocsátás szempontjából korlátozott világban.

A nem fosszilis erőforrásokból történő hidrogéntermelés alternatív eljárásai kereskedelmi forgalomban kaphatóak, de csak kisebb léptékű felhasználásra alkalmasak. Ahhoz, hogy nagyüzemekben alkalmazhassák ezeket, gazdaságilag fel kell venniük a versenyt, az alacsony költségű és nagy mennyiségű szénhidrogént hasznosító technológiákkal[6]. A legambiciózusabb elképzelés szerint az összes szükséges hidrogént fenntartható energiaforrások felhasználásával szabadítanák fel vízből, és üzemanyagcellákban hasznosítanák, vagy hidrogénalapú belső égésű motorokban égetnék el[7]. Jelenleg a hidrogén előállítására szolgáló, megújuló energián alapuló eljárások, (víz elektrolízise fotovoltaiikus cellákkal vagy szélturbinákkal összekapcsolva, fotokatalízis, fotobiológiai vízbontás stb.) nem képesek olyan áron és olyan léptékben előállítani hidrogént, hogy az versenyezni tudjon a fosszilis tüzelőanyagokkal[8]. Így a fosszilis szénhidrogének, például a metán használata, – az áram-, hő- és villamosenergia-termelésben – valószínűleg mindaddig folytatódni fog, amíg gazdaságilag nem lesz kevésbé versenyképes olyan alternatívákkal szemben, mint a hidrogén[8].

Az olcsó metánból szén-dioxid keletkezése nélkül hidrogén állítható elő pirolízissel (4. egyenlet), amely során hidrogén és szilárd karbon keletkezik[9]. Korábban már tettek kísérleteket, a hidrogén előállítására szolgáló pirolízis technológiák kereskedelmi forgalomba hozatalára. Ennek sikerességét azonban korlátozta az a tény, hogy a pirolízis technológiák szilárd katalizátor használatát igénylik, ami gyorsan deaktiválódik, csökkentve ezzel a hidrogénhozamot. Az értékesebb szilárd széntermékek (pl. korom) előállítására viszont a pirolízist már kereskedelmi forgalomban is alkalmazták[10], [11].

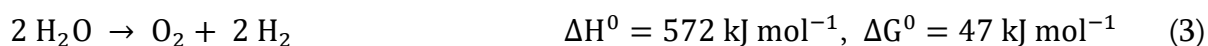
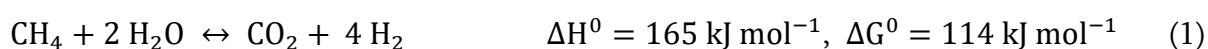


A Földön a hidrogén jelen van a vízben, a biomasszában és szinte valamennyi szerves vegyületben. A hidrogén nem energiaforrás, hanem másodlagos energiahordozó, amelyet nem lehet közvetlenül kitermelni, csak valamilyen egyéb energiahordozó felhasználásával előállítani (MHT egyesület). A hidrogén többféle eljárással és energiaforrásból állítható elő.[12]

2 Introduction

Fossil hydrocarbons possess enormous stored chemical potential from prehistoric photosynthetic processes. Humanity has globally prospered because of their widespread availability and relatively low cost. At present we combust approximately 10 trillion kilograms of carbon in low cost fossil fuels annually. Their use, however, is ultimately limited by the fact that they are a finite resource. In the shorter term, before the prices increase due to depletion, the risk of unacceptable environmental consequences from increased atmospheric CO₂ may drive society towards alternatives to ensure sustained human prosperity[1]. The immense challenge of shifting away from carbon dioxide intensive processes to more sustainable alternatives will require many massive projects and investments spanning decades and generations[2]. Of the fossil resources, methane in natural gas provides the most energy per unit mass of carbon dioxide produced and is potentially the largest fossil reserve (if hydrates are included)[3]. Substitution of coal by methane would achieve significant emissions reductions. However, for the long term moving to fuels that produce no CO₂ is highly desirable. Hydrogen, burns cleanly producing only water and can be used in fuel cells; it has long been a candidate for a major future fuel. Today, 96% of global hydrogen is produced by fossil fuel reforming technologies (Eq. 1 and 2) and is predominately used in the production of ammonia-based fertilizers for agriculture[2]. The remaining 4% is produced by electrolysis that splits water with electricity that could potentially be CO₂free (Eq. 3).

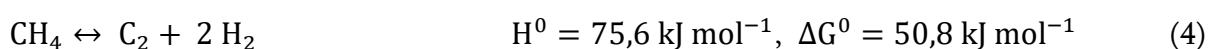
The most common hydrocarbon based hydrogen production technology is steam methane reforming (SMR) which satisfies approximately 48% of global demand. SMR produces stoichiometric amounts of process-based CO₂ from the combination of steam reforming and the water-gas shift reactions and additional combustion-based CO₂ when supplying the heat required to drive the overall endothermic reaction[4].



A typical SMR hydrogen plant produces approximately 9-10 tonnes of CO₂ equivalent per tonne of hydrogen[5]. By contrast, if hydrogen were to be produced by coal gasification (currently 18% of global H₂ production), the CO₂ emissions per tonne of hydrogen product would double compared to SMR. Put simply, hydrogen produced from fossil hydrocarbons using today's fossil-based technology has diminished value as a fuel in a carbon constrained world.

Alternate processes for hydrogen production from non-fossil resources are commercially available for small markets, but to be economically competitive for large-scale applications the technologies need to compete with technologies that utilise low-cost and abundant hydrocarbons[6]. In the most ambitious vision, all the hydrogen required would be liberated from water using sustainable energy sources and utilized in fuel cells or burned in hydrogen-based thermal engines[7]. At present, renewable energy-based processes for hydrogen production (electrolysis of water coupled with photovoltaic cells or wind turbines, photo-catalysis, photo-biological water decomposition, etc.) cannot produce hydrogen at a price or scale that is competitive with fossil fuels[8]. As such, the use of fossil hydrocarbons such as methane for power, heat and electricity production is likely to continue until they become less economically competitive than alternatives like hydrogen[8].

Low-cost methane can be used to produce hydrogen without producing carbon dioxide by pyrolysis (Eq. 4) which produces hydrogen and solid carbon[9]. Previous attempts at commercializing pyrolysis technologies for hydrogen production have been limited by the need to use a solid catalyst, which rapidly deactivates, decreasing hydrogen yields. However, for production of more valuable solid carbon products (e.g. carbon black) pyrolysis has been used commercially [10], [11].



On Earth, hydrogen is present in water, biomass and almost all organic compounds. Hydrogen is not a source of energy, but a secondary energy carrier that cannot be extracted directly, but can only be produced by using some other energy carrier (MHT compound). Hydrogen can be produced by a variety of processes and from a variety of energy sources[12].

3 A hidrogén fajtái

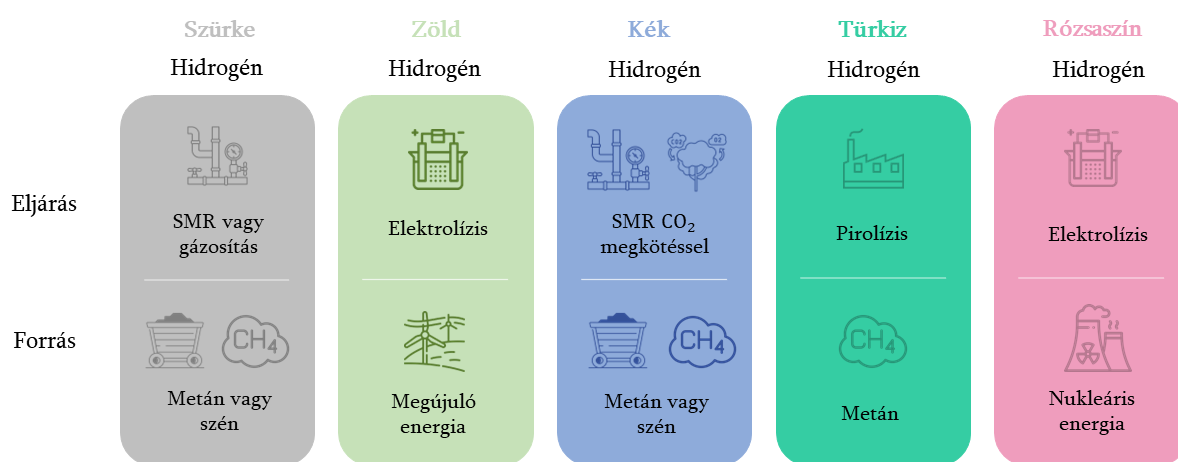
A hidrogén többféle eljárással és energiaforrásból állítható elő, ezért fontos elkülöníteni a tiszta, illetve az alacsony károsanyag-kibocsátással járó hidrogén előállítását (Európai Parlament 2021). Az alábbi színkód-nevezéktan segíti a megkülönböztetést és a kommunikációt. A szürke hidrogént fosszilis energiahordozókból (földgáz, metán, szén) állítják elő gőzreformálás (steam methane reforming, SMR) vagy szénelgázosítás eljárással. Az eljárás során keletkező hidrogén mellett szén-dioxid kerül a légkörbe, ami miatt ez a technológia nem alkalmas a nettó nulla kibocsátás eléréséhez.

Amennyiben a szürke hidrogén előállításakor keletkező szén-dioxidot leválasztják és tárolják (carbon capture and storage, CCS) úgynevezett kék hidrogén keletkezik. Az

eljárás során a szén-dioxid befogási hatékonysága 85–95 százalékos, tehát 5–15 százalék szén-dioxid ekkor is kikerül a légkörbe.[12] Ezen kívül a folyamatban használt metán szivárgásával is számolni kell, amely hatékonyabb üvegházhatású gáz, mint a szén-dioxid. További hátránya, hogy véges forrásokat használ, ki van téve a fosszilis tüzelőanyagok áringadozásainak, nem felel meg az energiabiztonságra vonatkozó céloknak és nem övezi társadalmi elfogadás. A kék hidrogén előállítása tehát csökkentheti a szén-dioxid kibocsátást, de nem felel meg teljesen a „nettó-nulla jövő” követelményeinek. Az energiaátmenet korai szakaszában emiatt rövid távú átmenetként lehet tekinteni a kék hidrogént a zöld hidrogén térnyerése előtt[13].

A zöld (megújuló, tiszta, karbonmentes) hidrogén a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energiával történő vízbontás során keletkező hidrogént jelenti. A vízbontás (elektrolízis) a vízmolekulák (H_2O) alkotóelemeikre, hidrogénre (H_2) és oxigénre (O_2) bomlása villamos energia segítségével, mert az elektrokémiai behatás megbontja a kötéseket. Ez az eljárás nem jár lokális káros kibocsátással és a keletkezett hidrogén felhasználása sem.

Elsősorban három nagy csoportot különböztetünk meg hidrogéntermelés szempontjából, de akadnak ettől eltérő csoportok is. Ezeket a következő ábra szemlélteti.



1. ábra – A hidrogén típusai

4 Hidrogén előállítása metánból

4.1 Gőzreformálással

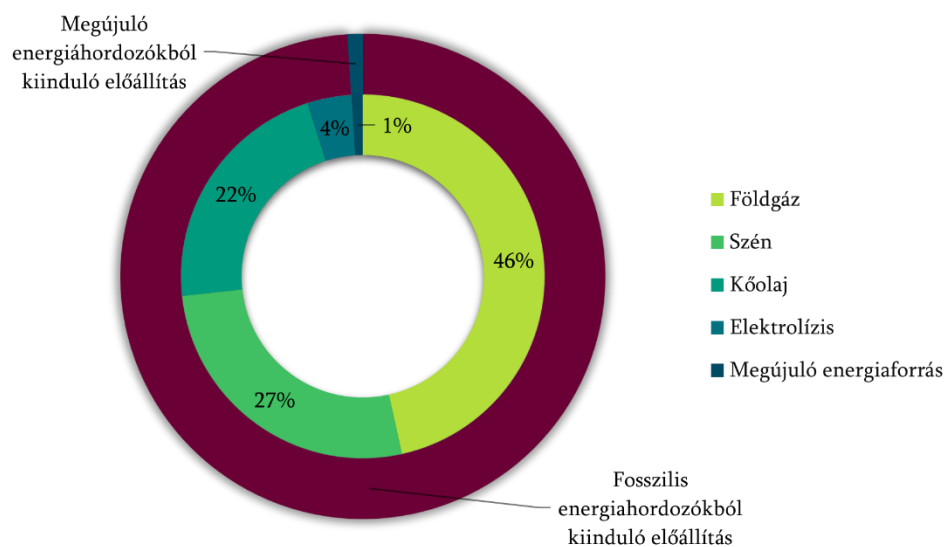
A hidrogén előállítás hagyományos és az iskolában is gyakran bemutatott módja, amikor cinkre sósavat öntünk. Ekkor hidrogéngáz fejlődik és cink-klorid keletkezik



Ugyanakkor valamilyen alkálifém, például nátrium vízzel történő reagáltatása is közismert módszer lehet. Ilyenkor szintén hidrogéngáz keletkezik



Azonban nagy mennyiségű hidrogén előállítására nem a fenti módszereket használják. A hidrogén nagyon sok anyagban előfordul, tehát elvileg nagyon sokféleképpen előállítható, de jelenleg a fosszilis energiahordozókból kiinduló előállítási módszer dominál. Ezen belül is meghatározó a földgáz, pontosabban a metán (CH_4) felhasználásával történő hidrogén-előállítás. Ezt a módszert gőzreformálásnak is nevezik, angol rövidítése: SMR (*Steam Methane Reforming*)[14].

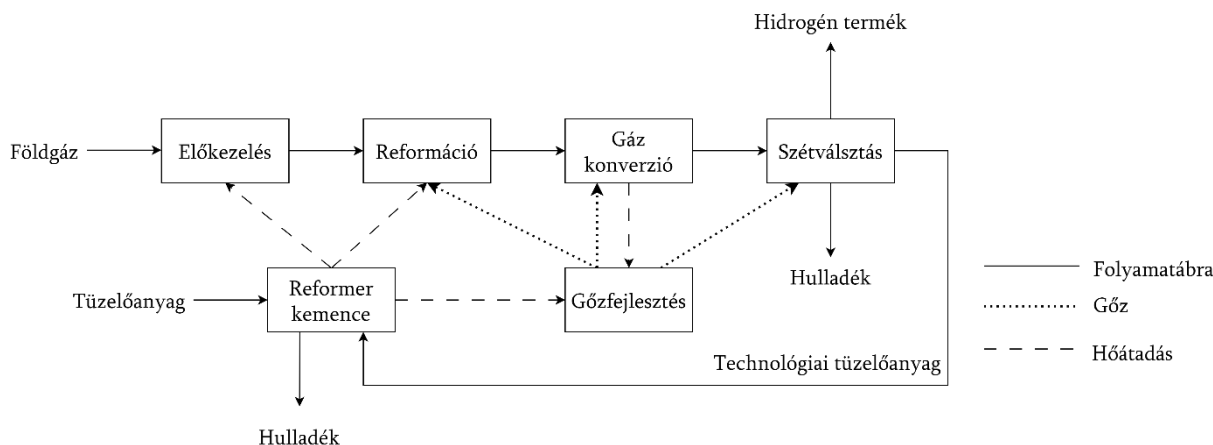
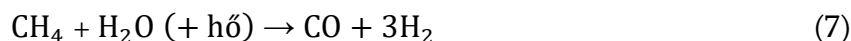


2. ábra – A hidrogéntermelés módjainak megoszlása világszerte százalékosan[82]

A gőzzel történő metánreformálás (SMR) egy kiforrott termelési folyamat, amelyben magas hőmérsékletű gőz (650°C - 1000°C) segítségével metánforrásból, például földgázból hidrogént állítanak elő[15]. Az energetikában az SMR a legszélesebb körben alkalmazott eljárás hidrogén előállítására.

A gőz-metán reformálás során a metán 5-40 bar nyomáson (1 bar = 14,5 psi), katalizátor jelenlétében gőzzel reagál, és hidrogént, szén-monoxidot és viszonylag kis mennyiségű szén-dioxidot termel[15]. A gőzreformálási reakció endoterm, azaz a reakció lefolytatásához hőt kell a folyamatba juttatni.

A gőzzel történő metánreformálási reakció



3. ábra – Sematikus ábra egy tipikus SMR rendszer folyamatáramáról és hőátadásáról

Az így készült hidrogént „szürke” hidrogénnek nevezi a szakma. 1 kg szürke hidrogén előállításához (technológiától függően) kb. 4,5 m³ földgáz felhasználása szükséges[16].

A szürke hidrogén előállítása jelentős szén-dioxid-kibocsátással jár, kb. 8-12 kg CO₂ kerül a légkörbe minden előállított kilogramm „szürke” hidrogén után[17].

4.2 Pirolízissel

4.2.1 Technológiai fejlesztés

A metán pirolízises átalakítása során hidrogént és szilárd kARBONT kapunk. Az utóbbi kezelése jelentős kihívások elé állítja a mérnököket. A szilárd karbon ugyanis elszennyezi (kokszolja) a szilárd katalizátorokat, beleértve a fémeket[18]–[20], fémoxidokat[21], [22] és a szénalapú katalizátorokat[23], [24]. A technológia támogatói úgy vélik, hogy ezek a problémák megfelelő folyamat- és reaktortervezéssel kiküszöbölhetőek[25]. Egyes eljárásokban a katalizátort szén elégetésével regenerálják, de ez jelentős CO₂ kibocsátást eredményez[26]. A szilárd katalizált metánbomlást széles körben vizsgálták annak érdekében, hogy értékesebb szeneket tudjanak képezni elsődleges termékként, mint például grafitos turbosztraktikus szenek, szén nanocsövek és szénszálak[27]. Az előnyben részesített hőmérsékleti tartományokról, a képződő széntermékekről és a katalizátorokról máshol részletesen beszámoltak, így azokat itt nem tárgyalom[8].

A legújabb fejlesztések eredményei azt mutatják, hogy lehetséges a metán pirolízis nagyszabású, gyakorlati, életképes és CO₂ kibocsátás nélküli alkalmazása. Mégpedig katalitikus fémeket tartalmazó olvasztott folyadékrendszerek segítségével[2], [26]. A laboratóriumi kísérletek arra utalnak, hogy a szén korlátozott oldhatósága olvadt fémekben lehetővé teheti a szén folyamatos eltávolítását. Valamint kiküszöbölheti a katalizátor deaktiválódását, ami korábban megakadályozta, a metános krakkolási folyamatok ipari léptékű kialakulását[28]. A folyékony fémeket, mint katalizátorokat már más folyamatok részeként is megfigyelték, többek között az alkohol-dehidrogénezése [29]–[34], hidrogénátviteli reakciók [35] és hulladék pirolízis[36], [37] során.

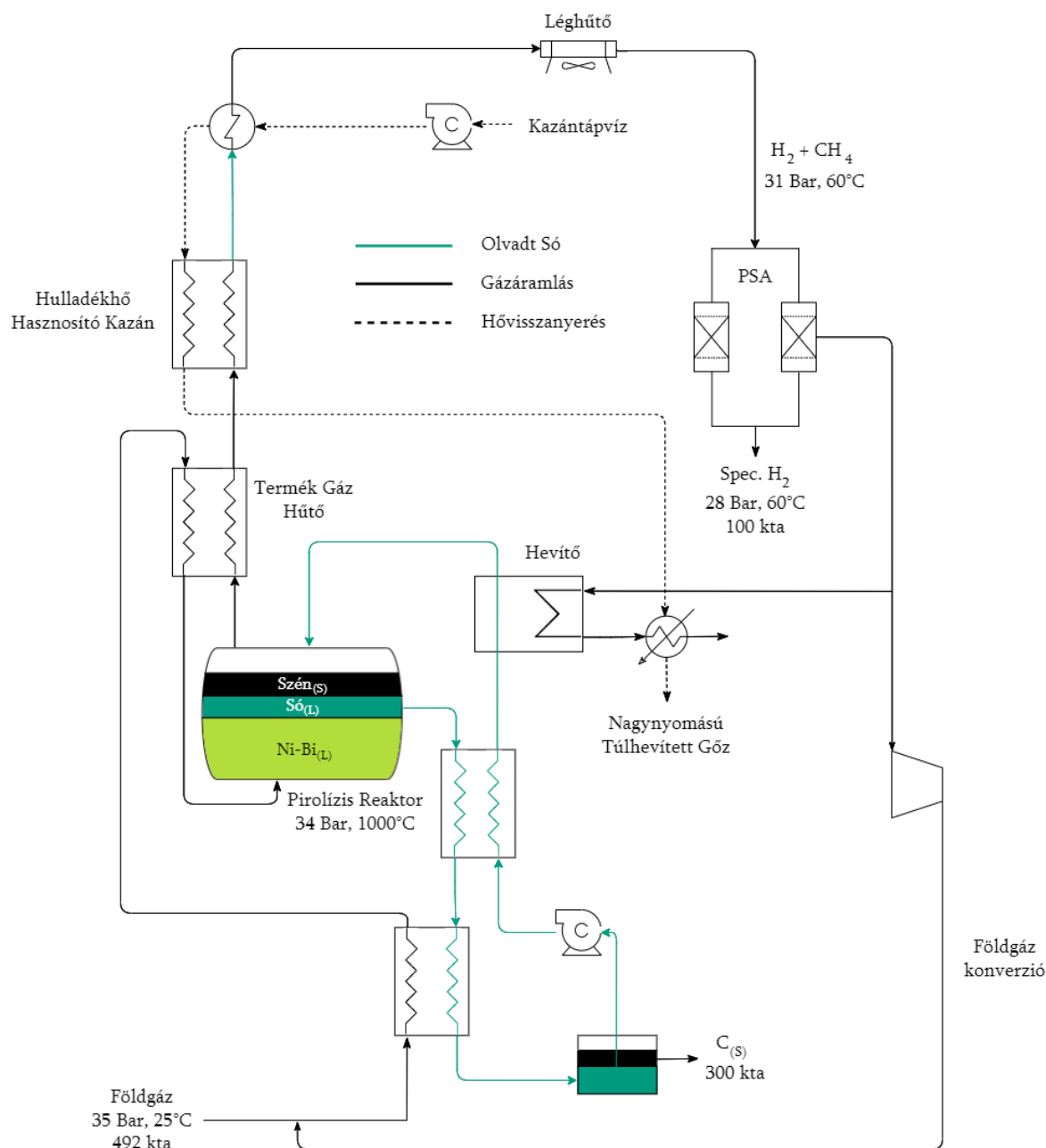
Steinberg és munkatársai[38], [39] javasolták elsőként, hogy a metán pirolízisekor olvasztott fémeket használjanak a szénhidrogének dekarbonizálására. Azóta számos vizsgálat készült a metán pirolíziséről alacsony olvadáspontú fémek (ólom és ón), hevített szilárd anyagok (timföld, szilikakarbid) és ezek kombinációinak felhasználásával[40]. A folyékony ónban lévő szilárd szilícium-dioxid-karbid szuszpenziójában 900 °C-on 57%-os maximális metánátalakulást értek el; a tiszta olvadt ónban elért 51%-os átalakuláshoz képest. Plevan és munkatársai[41] szintén összehasonlítottak egy olvadt ón buborékoszlopot és egy üres csőreaktort hasonló, 700-950°C-os hőmérsékleten. Egy 1 méteres buborékoszlopot használtak olvasztott ónból 1175 °C-on, amellyel 78%-os metánkonverziót értek el[28]. A legtöbb eljárásnál a hidrogént el kell választani a szén-oxidoktól, valamint a nem reagált metántól, hogy megakadályozzuk a katalizátormérgezést az ammóniagyártás és az üzemanyagcellás felhasználás során. A pirolízis csak az át nem alakult metán elválasztását igényelné, amelyhez leggyakrabban a nyomásingadozásos abszorpciót (PSA) használják. Mind az üzemanyagcellák, mind az ammóniaszintézis viszonylag érzéketlen kis mennyiségű metánra, így az elválasztási követelmények kevésbé szigorúak, mint az SMR-ben található szén-oxidok esetében.

Végül soron a pirolízis hasznossága, a metán szén-dioxid-mentes hidrogéntermelésre való felhasználásaként, az adott folyamatgazdaságosságtól függ[42]. A technológia még fejlesztés alatt áll, és nincs meg a nagyüzemi eljárások kifejlesztéséhez szükséges jelentős beruházás. Az SMR-egységekben az egyenáramú földgázátalakítás jellemzően 70-85%-os[5].

4.2.2 Metán pirolízis modell fejlesztése

A pirolízisre egy koncepcionális folyamatmodellt dolgoztak ki, amelyet a 4. ábra vázlatosan mutat be. A metán pirolízisét egy buborékoszlopban lévő olvadt fém katalizálja. Nem elegendő olvadt sót használnak az olvadt fémoszlop tetején, hogy hőt biztosítsanak és eltávolítsák a szenet a reaktorból. Forró sót adnak a reaktorhoz, és a hideg sót eltávolítják a pirolízis reakció során keletkező szénrel együtt. A Kaliforniai

Egyetemen (Santa Barbara) a közelmúltban végzett kísérleti adatok[43] alapján a buborékoszlop katalitikus olvadt fémkomponensét Ni-Bi ötvözet (27:73 mol%) felhasználásával méretezték. A metánbuborékokat 2 mm-es gáznyíláson, 1065 °C-on és 1,6 atmoszféra metánparciális nyomáson hozták létre, és a metánkonverzió 95%-os volt (az egyensúlyi konverzió 98%-os ilyen körülmények között). A katalitikus Ni-Bi olvadék aktivitása nagyobb metánátalakítást eredményez, mint más fémolvadék-rendszerek, például ólom vagy ón.



4. ábra – Metán pirolízis modelljének folyamatábrája

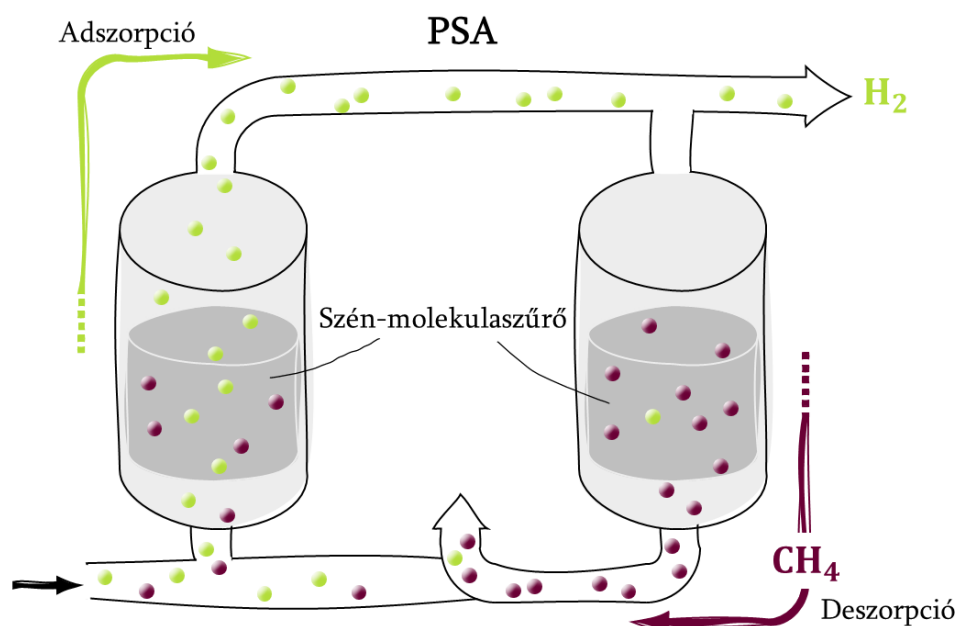
4.3 Kicsit a PSA-ról

4.3.1 Általánosságban

A levegőszétválasztás nyomáslengetéses adszorpcióval az elmúlt évtizedekben óriási fejlődésen ment keresztül, elsősorban egyszerűsége és alacsony üzemeltetési költségei miatt[44]. Legfőképp nagy tisztaságú hidrogén, metán és szén-dioxid kinyerésére használják, valamint nitrogén és oxigén előállítására. A Linde az adszorpciós technológia világelsőjeként több, mint 500 PSA berendezést tervezett[44]. A jól bevált rendszereket elsősorban különböző hidrogénben gazdag áramlatokhoz tervezték a tiszta hidrogén visszanyerésére és tisztítására. Ilyen áramlat például a gőzreformálás, de használják részleges oxidációból vagy gázosításból származó szintézisgázoknál, valamint a finomítók vagy petrokémiai folyamatok különböző mellékgázainál, pl. etilén mellékgázok, kokszolókemencegáz, metanol és ammónia tisztítógáz.

4.3.2 A folyamat – elválasztás adszorpcióval

A PSA technológia az adszorpció jelenségén alapszik. Ekkor a szilárd anyagok felületén megkötődnek az idegen anyag részecskéi. Az anyagok felületen elhelyezkedő atomjai, ill. molekulái saját részecskéikkel csak egyik oldalon érintkeznek, a másik oldalon az idegen fázis részecskéivel kerülnek kapcsolatba. Mivel a felületi atomokból, ill. molekulákból kiinduló erőket csak az egyik oldalon köti le az ugyanabban a fázisban lévő többi részecske, az erők egy része a szomszéd fázis felé irányul, és az ottani molekulákra hat.



5. ábra – PSA berendezés egyszerűsített ábrája

Azt a jelenséget, amikor a felületi réteg a vele érintkező fázis részecskéit magához vonzza, ezáltal a felület közelében az idegen anyag sűrűsége megnövekszik, adszorpciónak nevezzük[45].

A folyamat kapacitása a néhány száz m^3/h -ás berendezésektől a több, mint 400000 m^3/h -ás nagyüzemekig terjed. Az ezzel a technológiával előállított hidrogén minden tisztasági követelménynek megfelel és a legmagasabb visszanyerési arányok mellett akár 99,999 %-os tisztaságú is lehet[44].

Hidrogén

Oxigén
Argon

Nitrogén

Szén-monoxid
Metán

Szén-dioxid

Etán

Etilén

Propán

Bután

Propilén

Ammónia

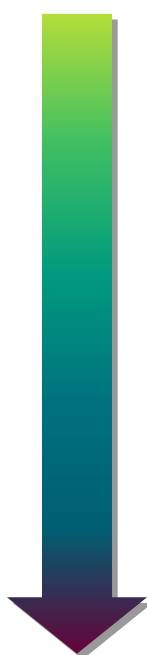
Hidrogén-szulfid

Metántiol

BTX (Benzol, Toluol és Xilolok)

Víz

gyenge



erős

Azt a jelenséget, amikor a felületi réteg a vele érintkező fázis részecskéit magához vonzza, ezáltal a felület közelében az idegen anyag sűrűsége megnövekszik, adszorpciónak nevezzük. Az adszorpciós erők minőségi rangsorát a 6. ábra mutatja[44].

Az elválasztás az adszorbens anyaghoz kötődő erők különbségein alapszik. Az alacsony polaritású, erősen illékony komponensek, mint például a hidrogén, gyakorlatilag nem adszorbeálhatók, szemben az olyan molekulákkal, mint az N_2 , CO , CO_2 , szénhidrogének és vízgőz. Következésképpen ezek a szennyeződések adszorbeálhatók a

6. ábra – Az adszorpciós erők minőségi rangsora

hidrogéntartalmú áramból, és nagy tisztaságú hidrogén nyerhető vissza[44].

4.3.3 A folyamat – adszorpció és regenerálás

A PSA-eljárás többnyire állandó hőmérsékleten működik. A váltakozó és a parciális nyomást használja fel az adszorpció és deszorpció elvégzésére. Mivel nincs szükség fűtésre vagy hűtésre, ezért nagyon gyorsan végbemehetnek ciklusok, akár percek alatt. Az eljárásnak köszönhetően nagy mennyiségű szennyeződés távolítható el gazdaságosan[44].

Az adszorpciót nagy nyomáson (és ezáltal nagy parciális nyomáson) végzik, jellemzően 10 és 40 bar közötti tartományban, amíg el nem éri az egyensúlyi terhelést[44]. Ekkor már nem áll rendelkezésre további adszorpciós kapacitás, és az adszorbens anyagot regenerálni kell. A regenerálás úgy történik, hogy a nyomást valamivel a légköri nyomás

főle csökkentik, emiatt az egyensúlyi terhelés ismét kellően lecsökken. Ennek eredményeként az adszorbens anyagon lévő szennyeződések deszorpción mennek keresztül, aminek hatására az adszorbens anyag regenerálódik. A regenerálás befejezése után a nyomást visszaemelik az adszorpció nyomás szintjére, és a folyamat kezdődik előlről. A folyamatos gázszolgáltatásra alkalmas PSA berendezések ezért két adszorber-egységből állnak, amelyek közül az egyik mindig adszorpció, vagyis termelési fázisban van, a másik pedig deszorpció fázisban lévén, regenerálódik[44].

4.3.4 Alkalmazása Magyarországon

A fentebb bemutatott PSA-eljárást alkalmazza az IBIDEN Hungary Kft. is Dunaharaszton, csak hogy nem a hidrogén visszanyerésére, hanem tiszta nitrogén és oxigén előállítására[46].

A levegőt nem kell cseppfolyósítani, viszont nagy gáztisztaság csak kis kihasználással érhető el vele. A PSA berendezésekkel 99,9%, illetve a kihozatal csökkentésével még nagyobb tisztaságú nitrogén, vagy maximum 95% tisztaságú oxigén állítható elő[46]. A működési elv mindkét esetben azonos, csak az adszorbens különbözik attól függően, hogy a levegő melyik főalkotórésze a termék. Az adszorberekben használt különböző típusú molekulasziták molekuláris méretű pórusaiban ugyanis a gázok szelektíven kötődnek meg, így az adszorpció, nagyobb nyomású szakaszban az egyik gázkomponens molekulái a tölteten maradnak, míg a másik molekulái a terméket alkotva továbbhaladnak. A következő fázisban a nyomást atmoszferikusra csökkentve, az adszorbeálódott molekulák deszorbeálódnak, és így a töltetről távozva a maradékgáz a szabadba ereszthető.

5 Üzemanyag-cella

5.1 Mi az az üzemanyag-cella?

Az angol nyelvű szakirodalomban „fuel cell” néven, a németben „brennstoffzelle” néven említik. A magyar nyelvben természetesen ez esetben is több elnevezése is meghonosodott. Ezek közül preferált és hivatalosnak tekinthető a „tűzelőanyag-cella” megnevezés, de egyesek a mobil alkalmazásokba épített változatokat „üzemanyag-cellának” is nevezik; illetve előfordul még olykor a „tűzelőanyag-elem” megnevezés is[47].

Az első üzemanyag-cellát már 1838-ban szabadalmaztatta Sir William Robert Grove, azonban a technológiát akkor még nem nagyon alkalmazták[48]. A technológia az űrkutatás beindulásával kapott lendületre, az űrhajókra ugyanis kellett valamilyen

áramforrás. Az üzemanyag-cella alkalmazásának előnyei először a 60-as években, a NASA Apollo-programjának keretein belül mutatkoztak meg[48]:

- mozgó alkatrészt nem tartalmaz
- érzéketlen az űrben fokozott hatású kozmikus sugárzásra
- érzéketlen a gravitáció és hőingadozás változására
- kis tömegű, kisméretű
- működése megbízható
- az üzemanyag-cella működéséhez szükséges hidrogén és oxigén az űrhajón, mint hajtóanyag megtalálható
- nincs károsanyag-kibocsátása

A tüzelőanyag-cellák elektrokémiai elven működő áramforrások, amelyek egy lépésben képesek az adott – üzemanyagként betáplált – vegyületekben (a legtöbb esetben a hidrogénben) tárolt kémiai energiát elektromos energiává alakítani, miközben járulékosan hő is keletkezik. Ebből következően a tüzelőanyag-cellák is a Galván elemek csoportjába tartoznak, akár csak az egyszer használatos szárazelemek, vagy a sokszor feltölthető, az autókban is immáron egyre szélesebb körűen alkalmazott és jól ismert lítium-ion akkumulátorok. Azonban utóbbiakkal szemben a tüzelőanyag-cella folyamatos üzemű Galván elemnek tekinthető, ami azt jelenti, hogy – szemben a szárazelemekkel és akkumulátorokkal – egy tüzelőanyag-cella mindaddig képes folyamatosan villamos energiát szolgáltatni, amíg a kiindulási anyagok (valamint az oxidálószer, ami a legtöbb esetben a levegő oxigénje) folyamatos betáplálása történik. Emiatt sokkal nagyobb lehet a hatótávolsága egy tüzelőanyag-cellás járműnek egy akkumulátorossal szemben[49].

Közlekedési eszközeink – mint például a személygépkocsik, teherautók, buszok és hajók – üzemanyag-cellákkal működtethetők[50]. Különösen fontos szerepet játszhatnak a jövőben, mivel általuk tisztább üzemanyagokra cserélhetnék a személygépkocsikban és teherautókban jelenleg használt kőolajat. Ilyen alternatíva például a hidrogén vagy a földgáz, melyek felhasználása kevesebb károsanyag-kibocsátással jár.

A helyhez kötött tüzelőanyag-cellák használhatók tartalék energiaként, távoli helyek energiaellátására, valamint elosztott és kapcsolt energiatermelésre (amikor a villamosenergia-termeléskor felszabaduló felesleges hőt más folyamatok során hasznosítják). Kihasználhatják az olcsó földgáz és az alacsony szén-dioxid-kibocsátású tüzelőanyagok, például a biogáz előnyeit. Az égetésen alapuló áramfejlesztőkhöz képest jelentősen jobb teljesítménnyel működnek és jóval kevesebb üvegházhatású gázt bocsátanak ki[50].

Az üzemanyag-cellák szinte minden olyan eszközt képesek ellátni energiával, amelyek általában akkumulátorral működnek, a kézi készülékektől kezdve a hordozható generátorokig[50].

5.2 Hogyan működik?

Magyarországon jelenleg a Természettudományi Kutatóközpont Anyag- és Környezetkémiai Intézetében folynak kutatások a Megújuló Energia Kutatócsoport tagjai által. A csoport tagjai egyrészt a hidrogénnek az előállításával, másrészt a hidrogénnek a felhasználásával foglalkoznak[49]. A hidrogén felhasználására a tüzelőanyag-cellákat vizsgálják elsősorban. Ahhoz, hogy a tüzelőanyag-cellákat kutatni tudják, ahhoz a katalizátorokat, amiket előállítanak előtte más vizsgálatok során tesztelniük kell. Katalizátor minden olyan anyag, ami egy bizonyos kémiai folyamatot elősegít úgy, hogy közben önmaga nem változik, nem fogy el a rendszerből. A katalizátorokat különféle kémiai folyamatokhoz használják, többek között az elektrokémiai folyamatok gyorsítására is. A csoport tagjai ezeket a katalizátorokat vizsgálják. A kikevert katalizátortintát finom permetként szénpapírra fújják ezzel előállítva a gázdiffúziós elektródát. Lássuk milyen szerepe van mindennek a tüzelőanyag-cellában.

Bizonyára mindenki jól emlékszik az első kémia órákról a vízbontásra tehát, hogy a vízből elektromos áram segítségével állítunk elő hidrogént és oxigént. Az üzemanyag-cellában ennek pontosan a fordítottja működik. A cella egyik oldalára hidrogént engedünk a másik oldalára pedig oxigént, minek eredményeként víz és elektromos áram keletkezik. Ez pontosan úgy történik, hogy a hidrogén is és az oxigén is beérkezik a cellába, középen találkoznak egy úgynevezett membrán-elektrod együttesel, ami tulajdonképpen a szíve az egész cellának. Ezt a membrán-elektrod együttest két oldalról egy-egy szénpapír határolja. Azért szénpapír, mert így vezetőként is funkcionál, miközben a gáz el tud benne diffundálni. A szénpapír felületére van felvéve a katalizátor, ami abban segít, hogy a folyamat egyáltalán le tudjon játszódni. Az üzemanyagcella lelkeként működő membrán csak a protonokat engedi át. Ennek következtében a hidrogén oldali reakcióban a hidrogénből lesznek protonok és elektronok. A protonok át tudnak menni a membránon, az elektronok pedig a bipoláris lemezen keresztül rámennek az áramszedőre, onnan pedig a fogyasztóra. A keletkező áram visszatér a rendszerbe a másik oldalon, ahol a rendszerbe vezetett oxigén a membránon átmenő protonokkal egyesülve az áram hatására vízzé alakul[49].

5.3 Tudományosabb megközelítésből

Fentebb már említettem, hogy a tüzelőanyag cella tulajdonképpen galvánelem. Tekintsük ezért át a galvánelemek működésére jellemző általános elveket!

5.3.1 Képződési szabadentalpia

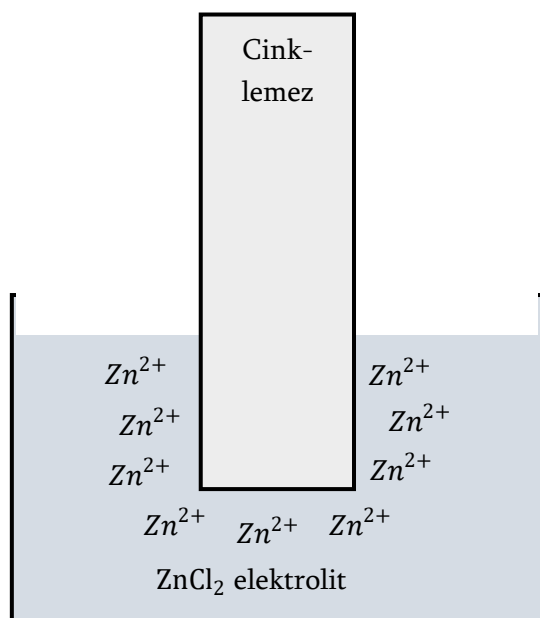
A galvánelemek működésekor kémiai energia alakul át elektromos energiává, miközben ionok keletkeznek és semmisülnek meg. Ahhoz, hogy ezek közül melyik folyamat melyik reakciópartnerrel játszódik le, segítséget nyújt a Gibbs-féle képződési szabadentalpiák ismerete (1. táblázat). A táblázat szerint bizonyos elemek hajlandók spontán ionos formába alakulni (ilyen pl. Al, Fe, Zn), bizonyos ionok viszont spontán elemmé alakulnak (ilyen pl. Ag^+ , Cu^{2+}). A hajlandóság mértékét a képződési szabadentalpia (ΔG) 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	ΔG (kcal/mol)
H^+	0
Ag^+	18,4
Al^{3+}	-115,0
Cu^{2+}	15,5
Fe^{2+}	-20,3
Zn^{2+}	-35,2

1. táblázat – Gibbs-féle képződési szabadentalpiák

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[51]. Ezt láthatjuk a 7. ábrán.



7. ábra – Cink lemez cink-klorid oldatban

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 vezetőn 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.

5.3.2 Elektródpotenciál és standardpotenciál

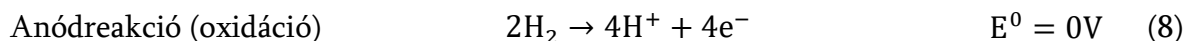
A képződési szabadentalpia helyett elektrokémiában a két elektrolitba merülő elektróda között mérhető potenciálkülönbségről beszélünk, ez az elektródpotenciál (másképpen cellafeszültség, elektromotoros erő, üresjárás feszültség). Mivel az elektródpotenciál mérhető, ellentétben a képződési szabadentalpiával.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

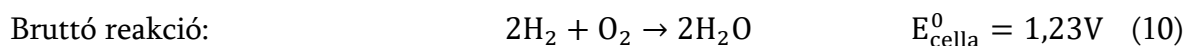
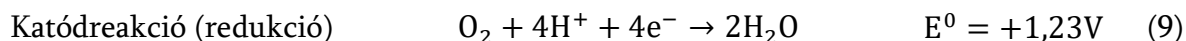
Ha tehát összeállítunk egy galvánelemet két különböző elektródából, akkor megmérve a köztük lévő feszültséget az elektródpotenciált kapjuk, de ez az elektródpotenciál mindig relatív, a másik elektródhoz viszonyított! Ahhoz, hogy felállíthassunk egy elektródpotenciálsort, szükség van egy referenciaelektróda kijelölésére. Ez a hidrogén elektróda, amely 25°C-on 1 bar nyomású hidrogén gázt, 1 mol/dm³ H⁺ iont tartalmazó oldatot és platina elektródot tartalmaz (nagyon hasonló a tüzelőanyag-cella félcellához)[51]. A hidrogén elektródából és egy másik elektródából összeállított galvánelem elektródpotenciálja a standard potenciál. Ez alapján összeállítható az elektródfolyamatok standardpotenciál sora (4. táblázat)[51].

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 – Elektródfolyamatok standardpotenciál sora

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 (PEM). Vizsgáljuk meg az anódon és a katódon lejátszódó reakciókat!



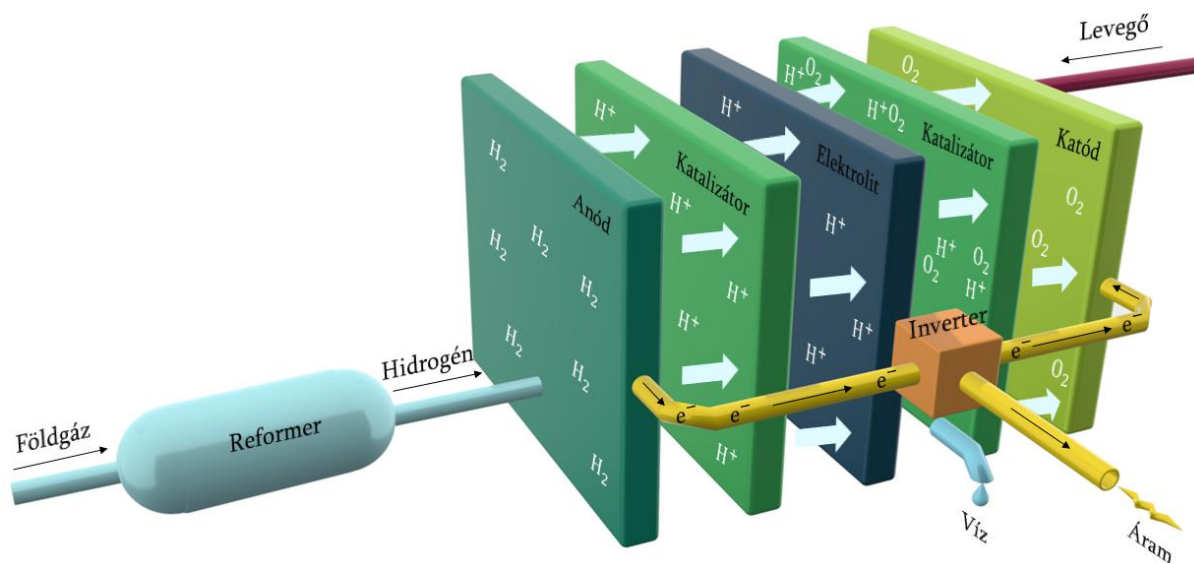


Elméletileg a maximális feszültség, amit ezáltal a reakció által létrejöhet 1,23V[52]. A gyakorlatban azonban a cella általában körülbelül 0,5V és 1V közötti feszültséget generál. Ekkora feszültség közel sem elég egy jármű meghajtáshoz, így ezeket a cellákat sorosan és párhuzamosan kapcsolva cellatelepeket alakítanak ki a nagyobb teljesítmény elérése érdekében. (Az "üzemanyag-cella" kifejezést gyakran használják a teljes telepre, valamint az egyes cellákra is.) Az üzemanyag-cella telep felhasználástól függően tartalmazhat csak néhány vagy akár több száz egymásra rétegzett egyedi cellát is. A PEM (proton exchange membran, azaz protonáteresztő membrán) típusú üzemanyagcella elsődleges felhasználási területe a járműipar, de a közép- és nagy villamos teljesítményt igénylő rendszerekben, berendezésekben is sikerrel alkalmazható[53]. Üzemi hőmérséklete alacsonynak mondható (100°C alatti)[50], hatásfoka pedig az egyik legnagyobb a többi üzemanyagcellához hasonlítva (60%)[50].

Az üzemanyag-cella olyan elektrolitból áll, amelyet két elektróda határol, egy anód és egy katód. Az anódot és a katódot az áramló közegektől egy porózus szerkezetű, gáz áteresztésére alkalmas, kapillárisokkal ellátott anyag, például műanyag választja el. A cella két oldalán lévő bipoláris lemezek segítik a gázok elosztását, miközben áramgyűjtőként is szolgálnak. A hidrogéngáz csatornákon keresztül áramlik az anódhoz, ahol egy katalizátor hatására a hidrogénmolekulák protonokra és elektronokra bomlanak. A katalizátor speciális papír vagy textil, amit finom platinaporral kezelnek. (Katalizátorként alkalmazható még róduim vagy ruténium, a hangsúly a jó hidrogén adszorbeáló képességen van.[51]) A membrán csak a protonokat engedi át. A protonáteresztő membrán egy speciális polimer. Míg a protonok a membránon keresztül a cella másik oldalára jutnak, addig a negatív töltésű elektronok áramlása egy külső áramkörön keresztül a katódhoz jut. Ez az elektronáradat olyan elektromosság, amellyel munkát tudunk végezni, például meghajthatunk vele egy elektromos motort.

A cella másik oldalán a levegő csatornákon keresztül áramlik a katódhoz. Amikor az elektronok visszatérnek a munkavégzésből, reakcióba lépnek a levegő oxigénjével és a (membránon átjutott) protonokkal a katódon, aminek hatására víz képződik. Ez az egyesülés exoterm reakció, azaz a folyamat hőt termel. Ez a hő az üzemanyag-cellán kívül felhasználható.

Az tüzelőanyag-cella által termelt energia több tényezőtől függ, többek között a tüzelőanyag-cella típusától, méretétől, a hőmérsékletétől, amelyen működik, és a gázok nyomásától.



8. ábra – PEM tüzelőanyag-cella vázlatos működése

Emiatt a "skálázhatóság" miatt ideálisan felhasználhatók az üzemanyag-cellák a legkülönbözőbb területeken. A laptopoktól kezdve, (20-50 W) a járműveken (50-125 kW) és az otthonokon (1-5 kW) keresztül, a központi energiatermelésig (1-200 MW vagy több)[50].

Az **anódreakció** platinabevonatú elektródon megy végbe, amely a folyamatot katalizálja (alacsonyabb energiaszintű reakció utat nyit meg).

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 8. ábrán követhetők nyomon.

5.4 Az üzemanyag-cella fejlesztésének magyar vonatkozása

Az üzemanyagcellák tárgyalásánál fontosnak tartom megemlíteni a magyar származású Oláh György Nobel-díjas professzort. 1977-től Kalifornia államban élt, ahol a Dél-kaliforniai Egyetemen (USC) tanított. Még abban az évben kinevezték az egyetem Szénhidrogénkutató Intézetének tudományos igazgatójává. 1991-től a Los Angeles-i Loker Szénhidrogénkutató Intézet (Loker Hydrocarbon Research Institute) igazgatója volt. 1994-ben Nobel-díjat kapott a karbon-kémiai kutatásaiban elért eredményeiért. Oláh György a metanolos üzemanyag-cellák fejlesztésével foglalkozott, ahol az üzemanyagot, a metanolt a földgázból nyerik ki[54].



1. kép – Oláh György

„Abban az üzemanyagcellában, amelyet mi kifejlesztettünk, metil-alkoholt égetünk. A metilalkoholt is úgy kell felfogni, mint energiatároló anyagot. Energia kell az előállításához, ezt az energiát tároljuk metanol formájában. Amikor aztán a metanolt elégetjük, a befektetett energiát visszakapjuk. Ugyanúgy, mint ahogyan a szénhidrogének, a kőolajtermékek vagy a földgáz, a széntartalom mindig szén-dioxiddá, a hidrogéntartalom pedig vízzé alakul. Persze, mondhatnánk, hogy környezetvédelmi szempontból ez a módszer is ugyanolyan káros, mint a ma használt üzemanyagok, hiszen szén-dioxidot termel, ami üvegházhatású gáz, és nagymértékben hozzájárul a Föld klímaváltozásához. A lényeges különbség az, hogy a széndioxidot hidrogénnel vissza lehet alakítani metil-alkohollá, új

üzemanyaggá. Ez nem százmillió évig tart, mint a kőolaj vagy a földgáz természetes keletkezése, hanem a kémiai folyamat rövid idő alatt végbemegy az üzemben. Az embernek így lehetősége lesz, hogy megfelelő szintetikus szén-dioxid körforgást alakítson ki. A szén-dioxid hidrogénezésekor általában csak kisebb százalékban keletkezik metilalkohol, és nagyobb mennyiségben hangyasav és formaldehid. A mi munkánkban azonban ezeket is át tudjuk metanollá alakítani, így ez a technológiai probléma is megoldható. Ugyanakkor a metil-alkohol nyersanyagként is felhasználható: előállíthatók belőle mindazok a termékek, amelyeket ma kőolajból és földgázból nyerünk. Egy igen egyszerű katalitikus folyamatban lehet belőle etilént (etént) vagy propilént (propént) készíteni. Ezekből pedig mindazokat a termékeket, amiket ma a kőolajipar és a vegyipar olajból vagy földgázból állít elő.”[55]

5.5 Üzemanyag-cella típusainak bemutatása és csoportosítása

Általánosságban elmondható, hogy minden üzemanyag-cella felépítése alapjában véve megegyezik – áll egy elektrolitból és két elektródából. Sokféle tüzelőanyag-cellát fejlesztettek ki, amelyeket elsősorban az elektrolit típusa szerint osztályoznak. Az elektrolit határozza meg a lezajló kémiai reakciókat, az üzemeltetési hőmérséklet tartományát és egyéb olyan tényezőket, amelyek megadják az üzemanyag-cellák legoptimálisabb működését.

A **protonátersztő membrános cellák (Proton Exchange Membran Fuel Cell – PEMFC)** működéséről fentebb már beszámoltam, így itt nem ismételném, de lássunk néhány kiegészítő információt a technológiájával kapcsolatosan.

A többi típusú üzemanyagcellával összehasonlítva sokkal jobb energia-, és teljesítménysűrűségi paraméterekkel rendelkezik. Egyik jellegzetessége, hogy a működési hőmérséklete a membrán anyagától nagymértékben függ. Membránként az egyik leggyakrabban használt anyag, a Nafion® esetében alacsonyabb a működési hőmérséklet, míg polybenzimidazole membrán esetén magasabb, akár a 200 °C-t is meghaladhatja.

A membrán általában egy szilárd műanyag lemez, amelyet platínával szoktak bevonni. A platina a legjobb katalizátor, viszont drága és ritka fém, ezért a platínát vagy ötvözetét minél kisebb mennyiségben kell leválasztani a protoncserélő membrán felületére.

Fontos szempont, hogy megfelelő legyen a rendszerben a nedvességtartalom, ugyanis a Nafion típusú membránok ionvezető képessége kis és nagy nedvességtartalom esetén is romlik. Újabban azonban léteznek már „szárazon” is üzemelő membránok. A nedvességtartalom szabályozása befolyással van még az elektródák közötti ozmózis nyomásra is, ugyanis ez határozza meg a membránon keresztüli nedvesség áramlásának irányát, amelynek egybe kell esnie a protonáramlás irányával, mert ellenkező esetben éppen gátolja azt. Másrészt a reakció végterméke is víz, ezért lényeges annak elvezetése. Emiatt érdemes a hőmérsékletet 80-90 °C között tartani, de ebben az esetben a reakciók lassan mennek végbe. A hőmérséklet szabályozása a hűtést és a fűtést is magában foglalja, ugyanis nagyon alacsony hőmérsékleten a membránba fagyott víz gátolja a protonok áramlását.

A tüzelőanyag-cella élettartamát és hatásfokát jelentősen befolyásoló tényező az üzemanyag tisztasága. A platina katalizátort könnyen elszennyezheti az üzemanyagba jutó CO, ezért ennek meg kell felelnie bizonyos tisztasági kritériumoknak. A megengedett szénmonoxid tartalomnak általában 100 ppm alatt kell lennie[56].

Reakciók:



Előnyei:

- Hatékony
- A szilárd elektrolit miatt nem érzékeny a gravitációra
- Gyors indulás
- Hosszú élettartam

Hátrányai:

- Körülményes szabályozás (az elektrolitot nedvesíteni kell)
- Az alacsony működési hőmérséklet miatt kicsi a hőhasznosítás hatásfoka
- A nemesfém tartalom miatt drága

Az **alkáli elektrolitos cellák** (Alkaline Fuel Cell – AFC) képviselik az egyik leginkább kidolgozott technológiát az üzemanyagcellák között. Már 1960 óta használják őket, többek között a NASA Apollo és Space Shuttle programjaiban is[56]. Az űrjárművek fedélzetén ilyen típusú cellák biztosították a fedélzeti eszközök működéséhez szükséges áramot, valamint az ivóvizet is. Az ilyen típusú üzemanyagcellákat feltalálójuk után Bacon-celláknak is szokták hívni.

Az alkáli elektrolitos cellák esetében a töltéshordozó részecske a hidroxidion (OH^-), amely a katódtól az anód felé halad, ahol reakcióba lép a hidrogénnel, amiből víz és elektron keletkezik.

Reakciók:



Előnyei:

- Az egyik legnagyobb elektromos hatásfokú cella
- Nagyon olcsó az előállítása, mivel sokféle elektrolittal képes működni
- Viszonylag alacsony a működési hőmérséklete
- Gyors indulás

Hátrányai:

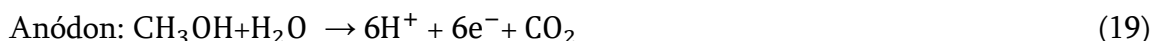
Nagyon érzékeny a szén-dioxidra, szén-monoxidra és a metánra, mivel ezek reakcióba léphetnek az elektrolittal, ezáltal csökkentve az tüzelőanyag-cella hatékonyságát. A külvilágtól elzárt környezetben érzi igazán jól magát, ahol nem fenyegetik az említett gázok. Működéséhez tiszta hidrogénre és oxigénre van szükség.

A **metanollal működő membrános tüzelőanyag-cella (Direct metanol Fuel Cell – DMFC)** folyékony metanolból állít elő elektromos és hőenergiát.

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 20-140°C, üzemi nyomása 1,5-4 bar[57]. Az elektródák platina-palládium bevonatúak (CO₂ 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 20 mV-tal növeli a cellafeszültséget[51]. A metanol bevezetése folyékony halmazállapotban ideális. Alkalmazása főleg kis teljesítményű hordozható eszközökben lehetséges, például számítógépekben, de kisebb járművek esetében is megfelelő alternatíva lehet, például targoncák számára.

Reakciók:



Előnyei:

- A metanolt könnyebb szállítani és tárolni, mint a hidrogént
- Nincs szükség üzemanyag-reformerre
- Kis helyigényű

Hátrányai:

- Habár a metanol energiasűrűsége nagy, az alacsony működési hőmérséklet miatt kicsi az elektromos hatásfoka és az áramsűrűsége
- Alacsony működési hőmérséklete miatt több katalizátort igényel a működéséhez
- A metanol mérgező és gyúlékony

A **foszforsavas cellák (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC)** kerültek elsőként kereskedelmi forgalomba az üzemanyagcellák közül. Az 1960-as évek közepén fejlesztették ki ezt a típust, és már a rákövetkező évtizedben sor kerülhetett az első eladásokra. Más üzemanyagcella-típusokhoz képest akkor jóval stabilabb viselkedést mutatott, nagyobb teljesítményre volt képes, és mindezek mellett az ára is elég alacsony volt. E cellákban az elektrolit teljes egészében foszforsavból áll (H_3PO_4). Mivel a foszforsav ionos vezetése alacsony hőmérsékleten rossz, ezért a működési hőmérsékletük elég magas, gyakran a 200°C -t is meghaladja[57]. A működése nagyjából azonos a protoncsere-membrános celláéval. Ennek megfelelően az anódon és katódon lejátszódó reakciók is azonosak.

Reakciók:



Előnyei:

- A magas működési hőmérséklet hatékony hőhasznosításra ad lehetőséget
- Érzéketlen a szén-dioxidra és a szén-monoxidra
- Hosszú élettartam (a foszforsav illékonyasága nagyon alacsony)
- Stabilitás
- Egyszerű felépítés

Hátrányai:

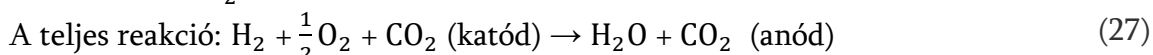
- Nagy méret
- Platinakatalizátor szükséges
- Nehezen indítható (a foszforsav 40°C alatt szilárd)

Az **olvadék karbonátos cella (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC)** a magas üzemi hőmérsékletű cellák családjába tartozik. A magas üzemi hőmérséklet lehetővé teszi, hogy közvetlenül földgázzal is működtethessük a tüzelőanyag-cellát. Az 1960-as évek közepén fejlesztették ki, és azóta a legnagyobb eredményeket a teljesítmény és az élettartam

növelésének tekintetében érték el. Az ilyen típusú cellák a többi cellától eltérő módon működnek. Elektrolitként olvadt karbonát-sókat tartalmaznak, általában két karbonát keverékéből. A két leggyakoribb kombináció: lítium-karbonát és kálium-karbonát keveréke.

A magas üzemi hőmérséklet ahhoz szükséges, hogy az elektrolit megolvadjon, és megfelelő ionáteresztő képességet érjen el. Olvadása után az elektrolit képes lesz arra, hogy vezesse a karbonátionokat (CO_3^{2-}). Ezek az ionok a katódtól az anód felé haladnak, ahol hidrogénnel egyesülve víz, szén-dioxid és elektron keletkezik. Az elektron pedig egy külső áramkörön keresztül áramot és hőt termelve érkezik vissza a katódra.

Reakciók:



Előnyei:

- A magas működési hőmérséklet miatt nincs szükség üzemanyag-reformerre. Az ilyen tüzelőanyag-cellákat belső reformeres celláknak is nevezik.
- A magas működési hőmérséklet hatékony hőhasznosításra ad lehetőséget
- A magas hőmérsékletű működés és a belső reformálási reakciók miatt nem szükséges tiszta hidrogén az üzemeltetéséhez, hanem hidrogént tartalmazó vegyületek (szénhidrogének) alkalmazása is megengedett, tehát ugyancsak tüzelőanyag-flexibilis
- Olcsó alapanyagok

Hátrányai:

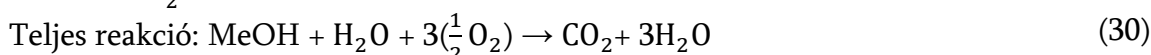
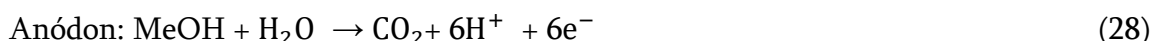
- Érzékeny a korrózióra
- Lassú indulás
- Körülményes a szén-dioxid áramlásának szabályozása

A **szilárd-oxidos cella (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC)** elektrolitja yttrium-oxiddal (Y_2O_3) stabilizált cirkónium-oxid. Ez csak magas hőmérsékleten válik ionvezetővé, ezért a cella üzemi hőmérséklete 1000°C körüli[52]. Az elektrolit oxigén ionokat vezet a katódról az anódra. 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

tüzelőanyagcellákkal az MCFC magas üzemi hőmérséklete miatt szénmonoxid és széndioxid mérgezés nem lép fel.

A SOFT tüzelőanyag-cella hatásfoka nagyon kedvező 60-65%-os[58], hőerőművekben, villamos erőművekben és háztartásokban is alkalmazható. Teljesítménye néhány kW-tól több száz kW-ig terjed.

Reakciók:



Előnyei:

- Magas hatásfokú
- Hosszútávú stabilitás
- Toleráns az input anyagokban található szennyezésekre
- (Az MCFC-hez hasonlóan) tüzelőanyag-flexibilis

Hátrányai:

- Magas hőmérsékletet elviselő anyagokat igényel
- Lassú teljesítményváltoztatásokra képes
- Viszonylag hosszú a beüzemelési ide

Üzemanyag-cella típus	Protonáteresztő membrános (PEMFC)	Alkálikus (AFC)	Metanollal működő membrános (DMFC)	Foszforsavas (PAFC)	Olvadék-karbonátos (MCFC)	Szilárd-oxidos (SOFC)
Elektromos hatásfok	$\eta = 50..70\%$	$\eta = 60..70\%$	$\eta = 20..30\%$	$\eta = 50..60\%$	$\eta = 50..60\%$	$\eta = 60..65\%$
Üzemi hőmérséklet	60..90°C	60..200°C	20..140°C	150..200°C	~650°C	~1000°C
Elektrolit típusa	Protonáteresztő membrán (nafion)	30%-os vizes kálium-hidroxid oldat	Protonáteresztő membrán (nafion)	Tömény folyékony foszforsav	Olvadt lítium-, nátrium- és kálium-karbonát	Szilárd cirkónium-oxid
Felhasználási területek:	Járműipar Hadiipar Hordozható áramforrások Erőművek	Tengeralattjárók Hajók Hadiipar	Elektronikus eszközök Kisebb járművek Hordozható áramforrások Hadiipar	Épületek energiaellátása Erőművek Hadiipar	Kogenerációs erőművek Segédáramforrások	Hadiipar Segédáramforrások Repülés Űrkutatás

3. táblázat – Üzemanyag-cella típusok összehasonlítása

6 A hidrogénelőállításra vonatkozó jogszabályok

Érdemes megvizsgálni kicsit a hidrogén és tüzelőanyag-cellás technológiák szempontjából releváns jogszabályokat, illetve azon jogi vagy eljárási akadályokat, amelyek a kereskedelmi terjeszkedésüket esetleg nehezítik vagy lassítják.

Magyarországon jelenleg néhány hidrogén előállító üzem működik, meglehetősen eltérő termelési kapacitással. Némelyikük már évtizedek óta üzemel. Valamennyi létesítmény közös jellemzője, hogy vegyipari célokat szolgálnak: kőolajfinomítóban, vegyipari üzemben, műtrágyagyárban, és néhány kisebb üzemben működnek. A nagy kapacitású hidrogénüzemek (mint pl. a MOL Dunai Finomítóban, vagy a BorsodChem telephelyén) a hidrogént felhasználó telephelyeken, azon belül jellemzően a hidrogént felhasználó folyamatok közelében létesültek. A kisebb kapacitású hidrogén végfelhasználók (pl. üveggyár; védőgázként, esetleg hűtőközegként történő felhasználások) esetén valamely ipari gázgyártó cég telephelyén történik a hidrogén előállítása, majd teherautón, közúti szállítás során juttatják el a hidrogént a kisebb felhasználókhoz. A meglévő hazai hidrogén előállítási módokra szintén általánosan jellemző, hogy a hidrogént az úgynevezett gőzreformálásos (SMR) eljárással állítják elő, alapanyagként földgázt (esetleg magasabb rendű szénhidrogént) felhasználva. Az SMR előállítási eljárás viszonylag számottevő környezetterheléssel jár, ráadásul finomítók esetében a hidrogén előállító üzem az EU Emissziókereskedelmi Rendszerének (EU ETS) hatálya alá is tartozik. A hazai hidrogén előállításnak csupán nagyon csekély része történik elektrolízissel (azaz a víz egyenáram segítségével végzett bontásával), és ezen előállítási mód jellemzően csak laboratóriumi léptékben, vagy igen kis számú K+F+D („prototípus”) fázisban lévő berendezésekben történik. A fentiekből következően a jelenleg előállított hidrogén vegyipari célokat szolgál, és – nagyon kevés és kisléptékű alkalmazástól eltekintve – nem energiatárolási, vagy nem (közvetlen) üzemanyag termelés céljából történik az előállítás. Kisléptékű, hálózattól független (sziget üzemű) rendszerben üzemelő projektekre már van példa, a Power-to-Gas „mini” (amely elektrolízist, hidrogén-tárolást, és tüzelőanyag-cellát is alkalmaz). A jelenleg Magyarországon zajló egyéb projekteket a későbbiekben ismertetem. A hidrogén előállítással, illetve az energiatárolással kapcsolatos jogi, adminisztratív akadályok feloldása fontos lenne tehát hazánkban is[59].

A legfontosabb jogszabályok, amelyek meghatározzák vagy befolyásolják a hidrogén előállítást (és ezek EU-s megfelelői) a következők: i) katasztrófavédelem (Seveso Irányelv) és tűzvédelmi szabályok; ii) környezeti hatásvizsgálat (EIA Irányelv); iii) egységes környezethasználati engedélyezés (IPPC/IED Irányelv); iv) területrendezési szabályok (övezeti limitációk). Utóbbinak főként a viszonylag kis léptékű, közvetlenül az üzemanyagtöltő állomásokon (on-site) végzett hidrogén előállítás esetében van

jelentősége. Általános jellegű és talán a legfontosabb probléma a jelenlegi hazai (de egyben EU-s) jogszabályi környezettel, hogy nem tesznek különbséget a különböző hidrogén előállítási módok között. Ismeretes, hogy egy adott hidrogén előállító létesítmény tradicionálisan SMR eljárást alkalmaz (amelynek jelentős környezeti hatása van, illetve lehet). Alternatív megoldásként közvetlen környezeti kibocsátással nem járó, környezet- és klímabarát eljárást, például víz elektrolízist is alkalmazhatunk (amely esetleg megújuló alapon, vagy low-carbon technológiával termelt villamos energiát használ fel). A területrendezés szempontjából is igaz, hogy az övezeti besorolások (limitációk) szintén nem differenciálnak hidrogén előállítási mód és üzemméret (kapacitás) szerint. Ez jelenleg azt jelenti, hogy a területhasználati előírások gyakorlatilag csak „ipari” besorolású (GIP jelű) övezetben engedélyeznék a hidrogén termelő technológia elhelyezését, amely súlyos – és indokolatlan – korlátozó megszorítás a kisebb H₂ előállító létesítményekre nézve. Ez az állítás, különösen igaz, az on-site hidrogén előállítást alkalmazó üzemanyagtöltő állomások esetében. Az övezeti besorolások megváltoztatása egy-egy település szintjén természetesen elvileg lehetséges, azonban amennyiben ezt a jövőben minden egyes hidrogén termelő (kis) egység esetében el kellene végezni, az erősen gátló tényező lenne, mivel a területrendezési tervek megváltoztatása idő- és költségigényes folyamat.

A hazai jogszabályokban megtalálható, fentiekben részletezett hiányosságok, bizonytalanságok nem kis részben a vonatkozó EU-s joganyagok hasonló hiányosságaiból fakad. Ez utóbbi pedig abból a „tradicionális” 3 szemléletmódból, feltételezésből fakad, hogy a hidrogén előállítása csak „klasszikus” – nagy üzemméretekben végzett – vegyipari folyamat lehet, amelyhez számottevő környezeti kibocsátások kapcsolódnak. Ezek a fenntartások azonnal okafogyottá válnak például a kis léptékű, elektrolízist alkalmazó hidrogén előállítási módok esetében. Ez utóbbi eljárás már jelenleg is számos nyugat-európai országban viszonylag elterjedt megoldás, és a jövőben várhatóan tovább terjed[59].

További probléma, hogy nincs egyszerűsített eljárás a hazai jogrendben a kisebb léptékű és/vagy környezetkímélő hidrogén előállításra vonatkozóan, amely főként a környezetvédelmi engedélyeztetések oldaláról jelent számottevő akadályozó tényezőt.

Kiemelendő, hogy több nyugat-európai ország számos városában már jelenleg is üzemelnek kis- vagy közepes kapacitású, on-site hidrogén előállításai technológiák, akár városközpontban működő hidrogén töltőállomásokon, amelyek – az adott ország jogrendje alapján – engedélyezhetők voltak. Hamburg belvárosában például olyan hidrogén töltőállomás működik, amely 1 MW beépített elektrolizáló teljesítménnyel rendelkezik[59].

6.1 Jogszabályi háttér

Főbb jogszabályok:

219/2011. (X. 20.) Korm. rendelet a veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos balesetek elleni védekezésről

31/2014. (II. 12.) Korm. rendelet az egyes sajátos ipari építményekre vonatkozó építésügyi hatósági eljárások szabályairól

314/2012. (XI. 8.) Korm. rendelet a településfejlesztési koncepcióról, az integrált településfejlesztési stratégiáról és a településrendezési eszközökről, valamint egyes településrendezési sajátos jogintézményekről

314/2005. (XII. 25.) Korm. rendelet a környezeti hatásvizsgálati és az egységes környezethasználati engedélyezési eljárásról

253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet az országos településrendezési és építési követelményekről (OTÉK)

54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról (OTÉSz)

35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt berendezések és védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról

6.2 Megállapítások

Összességében megállapítható, hogy gyakorlatilag az összes főbb, releváns jogszabály a hidrogén előállító létesítményekre úgy tekint, mint „tradicionális” vegyipari létesítményekre, függetlenül attól, hogy milyen előállítási módszert alkalmaz (SMR-t, vízbontást, stb), vagy hogy az előállítási folyamatban jelen vannak-e veszélyes anyagok (pl. erős lúg az alkálikus elektrolizálóknál, vagy PEM típusú elektrolizáló alkalmazása).

Az OTÉK által meghatározott településrendezési, építési szabályok között nincs kifejezett tiltás övezeti vonatkozásban a hidrogén előállító létesítményekre. Az OTÉK azt írja elő csupán, hogy tűzveszélyes és hasonló jellegű tevékenységek csak „ipari” (GIP jelű) övezetben telepíthetők. A nehézség az egyik oldalról az, hogy az OTÉK nem nevesíti explicit a hidrogén előállítást az egyes területhasználati övezetek felsorolásakor, másrésztől nem differenciál az előállító létesítmény kapacitása szerint: gyakorlatilag ugyanazon megítélés (övezeti besorolás) alá esne egy kis léptékű, on-site hidrogén előállítás, amelyet ráadásul környezetkímélő módon végeznek, mint egy valóban nagy léptékű, centralizált hidrogén előállító üzem. Habár elvileg lehetőség van adott település szabályozási tervének megváltoztatására, például egy kis léptékű on-site hidrogén előállító

technológia telepíthetősége érdekében (az övezeti besorolás megváltoztatásával), de egy ilyen folyamat idő- és költségigényes. 4 A technológia elterjedését érdemben akadályozná, ha településről-településre, telekről-telekre kellene övezeti besorolásokat megváltoztatni a helyi szabályozási tervben. A településrendezés, illetve maga az OTÉK nem tartozik az EU-jogharmonizált szakterületei közé, így talán könnyebben orvosolható lenne a probléma[59]..

Jelenleg a környezetvédelmi engedélyezés, különösen az egységes környezethasználati engedélyezés (IEA/IPPC), és részben a környezeti hatásvizsgálat szabályai is – a 314/2005 (XII.25.) kormányrendelet (Khvr.) alapján – kifejezetten előnytelenek, sőt komoly adminisztratív akadályt képeznek a kis léptékű hidrogén előállítás szempontjából. A hivatkozott kormányrendelet alapján még egy on-site, kis léptékű hidrogén előállítást is oly módon kell besorolni, illetve erre az (IPPC/EKH) engedélyeztetést úgy kell lefolytatni, mint egy kifejezetten nagy léptékű hidrogén üzemre, mivel a kormányrendeletben nem szerepel alsó küszöbérték a kapacitásra vonatkozóan, amely alatt nem lenne szükséges IPPC engedélyezési eljárás. Jelenleg tehát környezetvédelmi szempontból ugyanazon eljárást (IPPC/EKH: egységes környezethasználati engedélyezési eljárást) kellene lefolytatni egy kis kapacitású, környezetkímélő előállítási módot alkalmazó hidrogén termelő egységre, mint például egy finomító – valóban jelentős méretű – hidrogén üzemére. A vonatkozó EU irányelvet az IPPC engedélyezést eleve a jelentős méretű ipari létesítmények környezet szennyezésének csökkentése és szabályozása céljából alkották meg, viszont ez – első verzióként - 1999 körül történt, amikor a kis léptékű, és környezetkímélő hidrogén előállítási technológiák még nem voltak a piacon, tehát a jogalkotó ezekre még nem gondolhatott[59]. Másrészről IPPC engedélyezés vagy környezeti hatásvizsgálat lefolytatásának gyakorlatilag nincs is értelme, ha a hidrogén előállítás (lokális) környezeti kibocsátásokkal nem járó módszerrel (pl. elektrolízissel), kis léptékben történik. (Természetesen az elektrolízishez használt villamos energiának van vagy lehet környezet- és klímavédelmi hatása, de ezeket az adott erőmű környezetvédelmi engedélyeztetése során kell vizsgálni.) Ez a jogszabályi akadály tehát abból adódik, hogy a releváns EU irányelv (és következésképpen az ennek megfelelő hazai kormányrendelet) fogalomhasználata nem kellően szelektív és egyértelmű, továbbá nem tükrözi kellően a technika modern színvonalát, ugyanis a hidrogén előállítás jelenleg csak az „alapvető szervesetlen vegyi anyagok gyártása” címszó (tevékenységi kategória) alá sorolható be. Ráadásul e tevékenységi kategóriához a Khvr. nem rendel alsó kapacitás küszöböt, azaz bármilyen méretű „üzem” az IPPC hatálya alá tartozik.

Hasonló a probléma a magyar TEÁOR jegyzékkel, amely megfelel az EU gazdasági tevékenységeket osztályozó statisztikai rendszerének (NACE). A kapcsolódást a fenti problémához az adja, hogy a hatóságok egy-egy jogszabályi (pl. Khvr.) tevékenységi besorolást a TEÁOR alapján igyekeznek azonosítani, csak hogy a TEÁOR (illetve a NACE

is) kissé elavultnak, meghaladottnak tekinthető a modern hidrogén-technológiák szempontjából. A TEÁOR a következőt tartalmazza: „20.13 szervetlen vegyi anyagok gyártása”, amely alá jelenleg a hidrogén előállítás be lehet sorolni – sajnos annak végfelhasználási céljától, előállítási módjától, léptékétől függetlenül. A TEÁOR/NACE esetében sem merül fel sajnos, hogy a hidrogént esetleg tiszta üzemanyagként és/vagy energiatároló közegként lehetne előállítani, hanem kizárólag vegyipari alapanyaggyártásként szerepel. Mindez valószínűleg nem tudatos szakpolitikai döntés eredménye, hanem csupán arról van szó, hogy a releváns, olykor tizenöt évnél is régebbi jogszabályok nem tudták kellően követni a technológiai fejlődést[59].

A hidrogén termeléshez kapcsolódóan Seveso engedély (veszélyes üzem katasztrófavédelmi engedély) is szükséges lehet a 219/2011. (X.20.) kormányrendelet alapján, azonban ennek szükségessége nem a (tonna/nap) termelési kapacitáson, hanem az egyidejűleg tárolt hidrogén mennyiségén (tonna) múlik. Ezzel a fontos kérdéssel ezért a hidrogén tárolásra (2-es kategóriára) vonatkozó nemzeti szakpolitikai dokumentumban foglalkozunk.

A tűzvédelem természetesen kiemelt témakör, azonban szintén nem tartozik az Európai Unió joggal összehangolt szakterületek közé. A tűzoltóság jelenleg része az Országos Katasztrófavédelmi Igazgatóságnak, amely egyben a veszélyes áruk közúti szállításának szakterületéért (ADR) is felel. A tűzoltóság az esetek túlnyomó többségében nem önálló engedélyt ad ki, hanem szakhatóságként vesz részt különböző engedélyezési (pl. építési engedélyezési) 5 eljárásokban. Az Országos Tűzvédelmi Szabályzat (54/2014. BM rendelet, OTSZ) jelentős, kétszáz oldalnál is nagyobb terjedelmű jogszabály, azonban a „hidrogén” kifejezés explicit módon nem szerepel benne. Az OTSZ jellemzően olyan kategóriákkal dolgozik az előírások megállapítása során, mint például „gyúlékony gázok”, „robbanásveszélyes gázok”, amelyekbe a hidrogén természetesen besorolható, azonban kifejezetten hidrogénspecifikus szabályok jelenleg nem szerepelnek benne. Csak a már többé-kevésbé elterjedt üzemanyagokra, tüzelőanyagokra vannak specifikus szabályok, mint a CNG, vagy az LPG. Adott energiahordozóra, üzemanyagra vonatkozó explicit szabályok könnyebbé és gyorsabbá tehetnék az engedélyezéseket.

Összességében elmondható, hogy a hidrogén-specifikus szabályok, előírások hiánya a fent említett jogszabályokban – különösen a hidrogén-technológiák terjedésének kezdeti fázisában – várhatóan hosszabb engedélyezési eljárásokat, több bizonytalanságot okozhat. Következésképpen több egyeztetésre és elhúzódó tervezési folyamatra lehet szükség. Ugyanakkor némi kockázatot rejt magában, ha egy és ugyanazon hatóság különböző területi szervei esetleg nem értelmezik azonos módon a jogi, szabványi előírásokat. Ugyanakkor azt is látni kell, hogy már jelenleg is van néhány hidrogéntermelő üzem Magyarországon, amelyek nyilván átestek a megfelelő engedélyezésen, és ez egyfajta

engedélyezési gyakorlat meglétét is jelenti, ami legalább részben felhasználható lehet a jövőbeni üzemanyag és/vagy energiatárolási célú hidrogén előállító létesítmények esetében.

7 Üzemanyag-cella számokban

7.1 Mennyi hidrogénre van szükség egy üzemanyag-cella működtetéséhez

A szükséges hidrogén mennyisége az üzemanyag-cella hatékonyságától függ. Semmi meglepő nincs abban, hogy egy üzemanyag-cella nagyobb hatékonysággal működik újonnan, mint mikor az élettartama végén jár. Az eredeti berendezések gyártói (OEM-ek, Original Equipment Manufacturer) az élettartam kezdete (BOL, Beginning Of Life) és az élettartam vége (EOL, End Of Life) kifejezéseket használják. Az üzemanyag-cellák hatásfoka a BOL-időszakban körülbelül 51%, míg az EOL-időszakban ez a szám már csak körülbelül 45%[60].

A hidrogén szükséglet attól is függ, hogy milyen tüzelőanyag-cellát használunk. A mi tüzelőanyag-cellánk egy PEM cella, aminek a névleges mérete 250 kW[61].

A hidrogén a súlyához képest kiváló energiahordozó. 1 kg hidrogén 33,33 kWh hasznosítható energiát tartalmaz[62].

Ezeket az adatokat összevetve megkapjuk, hogy a

$$\dot{m}_{\text{óra}} \text{ (kg/h)} = \frac{P \text{ (kW)}}{E_{\text{felh.}} \text{ (kWh/kg)}} \quad (31)$$

ahol

- $\dot{m}_{\text{óra}}$, szükséges hidrogén mennyisége egy óra alatt
- P , az üzemanyag-cella teljesítménye
- $E_{\text{felhasználható}}$ pedig 1 kg hidrogén által előállított felhasználható energia.

Tehát a mi esetünkben ez

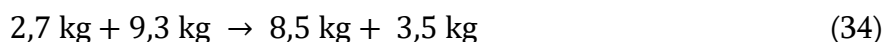
$$\frac{250 \text{ kW}}{33,33 \text{ kWh/kg}} \approx 7,5 \text{ kg/h} \quad (32)$$

7.1.1 Mire elég egy gallon üzemanyag és mennyi vizet termel?

A benzin elégetésekor az üzemanyag levegővel keveredik, pontosabban oxigénnel, aminek hatására szén-dioxid és víz keletkezik.

Benzinüzemű belsőégésű motorral működő jármű → 25 mpg (mérőföld/gallon)

1 gallon benzin = 2,7 kg üzemanyag



3,5 kg víz/25 mérőföld = 0,14 kg víz/mérőföld

Üzemanyagcellás jármű → 60 mppge (A mérőföld/gallon benzinegyenérték)

1 gallon benzinegyenérték $\approx$ 1 kg hidrogén



9 kg víz/60 mérőföld = 0,15 kg víz/mérőföld

Az üzemanyagcellás járművek kilométerenként körülbelül ugyanannyi vizet bocsátanak ki, mint a benzinüzemű belső égésű motorral működő járművek. A fenti számítások feltételezik, hogy egy benzinüzemű belsőégésű motoros jármű átlagosan 25 mérőföldet tesz meg gallononként, míg egy üzemanyag-cellás jármű átlagosan 60 mérőföldet tesz meg gallononként a hidrogén benzinegyenértékének megfelelően[63]. (Egy gallon benzinegyenértékű hidrogén energiatartalma megegyezik egy gallon benzinével [az alsó fűtőértékeket figyelembe véve], és megközelítőleg egy kilogramm [kg] hidrogénnek felel meg.)

Nem elhanyagolható tényező a képződő víz, számunkra most azonban más miatt lehet érdekes a fenti összehasonlítás. Mégpedig azért, mert az is megmutatkozik, hogy az üzemanyag-cella rendszer 2,4-szer olyan energiahatékony, mint a hagyományos belső égésű rendszerek, azaz 2,4-szer annyi mérőföldet tesz meg egy üzemanyagcellás jármű egy gallon benzinegyenértékű hidrogénnel, mint egy belsőégésű motoros jármű egy gallon benzinnel.

7.1.2 Mire használható ez a víz?

Jelenleg a tudományt elsősorban az foglalkoztatja, hogy iható-e a tüzelőanyag-cellák által előállított víz. A válasz egyelőre vegyes. Az egyszerű válasz az, hogy a víz elméletileg biztonságosan iható. Egy tanulmány megvizsgálta két kereskedelmi üzemanyagcella által előállított víz minőségét. Az eredmények azt mutatták, hogy a víz megfelelt az Egészségügyi Világszervezet (World Health Organization) és az Egyesült Államok Környezetvédelmi Hivatala (U.S. Environmental Protection Agency) által támasztott szinte valamennyi követelménynek[64].

A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a nikkel, a mangán és az alumínium könnyen ellenőrizhető a vízben. Valamint arra is kitér, hogy a PEM cellából - a tanulmányban vizsgált üzemanyag-cellából - származó víz képes lenne kielégíteni egy átlagos amerikai háztartás ivóvízigényét, amennyiben elérnék a 40%-os visszanyerési hatékonyságot[64].

A fő ok, amiért az üzemanyag-cellából származó víz nem lehet biztonságos ivóvíz, az az, hogy a rendszerben lévő egyéb összetevők szennyeződést okozhatnak. A hidrogén üzemanyag-cellák például gyakran olyan modern járműveket hajtanak, mint a Toyota Mirai. A víz a kipufogócsőből jön ki, és elég tisztának tűnik ahhoz, hogy meg lehessen inni. Az azonban kihívást jelent, hogy pontosan tudjuk, mi minden lehet még a vízmintában. Tegyük fel, hogy egy normál úton közlekedő jármű kipufogócsővéből jön. Ebben az esetben szennyeződés, kavics, por, kátrány vagy bármilyen más káros anyag kerülhet a vízbe.

Végző soron a hidrogén üzemanyagcellából felszabaduló víz iható, de a tudománynak számos más tényezőt figyelembe kell vennie és ellenőriznie ahhoz, hogy garantálni tudja a jó minőségű vizet. Egy ideális világban a hidrogén üzemanyag-cellák hatalmas mennyiségű ivóvizet állíthatnának elő a lakosság számára. Úgy tűnik azonban, hogy a technológia még nem fejlődött eleget ahhoz, hogy ez megvalósulhasson.

8 Fenntartható hidrogén előállítás

Az 5. pontban ismertettem az üzemanyag-cellák működési feltételeit és láthatjuk, hogy nagyon sok potenciál van bennük. Kulcsszerepet játszhatnak egy fenntartható jövőben, ahhoz azonban, hogy tényleg támaszkodni tudjunk rájuk hidrogénre van szükségünk. A fenntarthatóság szempontjából azonban elengedhetetlen, hogy a szükséges hidrogén is környezetkímélő módon legyen előállítva. A szakdolgozatom első felében bemutattam két módszert, amivel hidrogént állítanak elő. A probléma azonban azokkal a módszerekkel az, hogy nem környezetbarát eljárások. Egyrészt a folyamatok olyan

anyagok kibocsátásával járnak, amelyek káros hatással vannak a Földünkre. Másrészt meg nem újuló természeti erőforrásokat használnak, azaz belátható, hogy az állandó fogyasztásuk végül „felemészti” a Föld lehetőségeit.

Hidrogént azonban előállíthatunk más módon is, például elektrolízissel.

8.1 Mi az az elektrolízis?

Egyszóval vízbontás. Kicsit bővebben, olyan elektromos energia hatására létrejövő vízbontás, amely során a vízmolekulák (H_2O) alkotóelemeikre, hidrogénre (H_2) és oxigénre (O_2) bomlanak, mivel az elektrokémiai behatás a kötéseket bontja meg. Ez a reakció lényegében a tüzelőanyag-cellában lezajló folyamat fordítottja.

8.2 Hogyan Működik egy elektrolizáló?

A vízbontás ún. elektrolizáló cellákban játszódik le, két félreakció eredőjeként az egyes elektródákon. Az elektródák ionvezető elektrolitban helyezkednek el, amely lehet pl. lúgos oldat (alkálikus cellatípus esetében), vagy akár ionvezető polimer (PEM típusú elektrolizáló esetében). Gáz halmazállapotú hidrogén keletkezik a negatív elektródnál (katód) és oxigén a pozitív elektródnál (anód). A szükséges töltésáramlást a hidroxidionok (OH^-) vagy protonok biztosítják az elektrolitban, és elektronok (azaz elektromos áram) az áramkörben. Annak érdekében, hogy a két keletkező gáz ne keveredhessen, a két reakcióteret egy gáztömör, ion-áteresztő membrán választja el egymástól. A vízbontáshoz szükséges energiát elektromos áram formájában vezetik be a folyamatba, egyenáramként.

8.3 Elektrolizáló típusok

Az elektrolizálóknak alapvetően három típusát különböztethetjük meg:

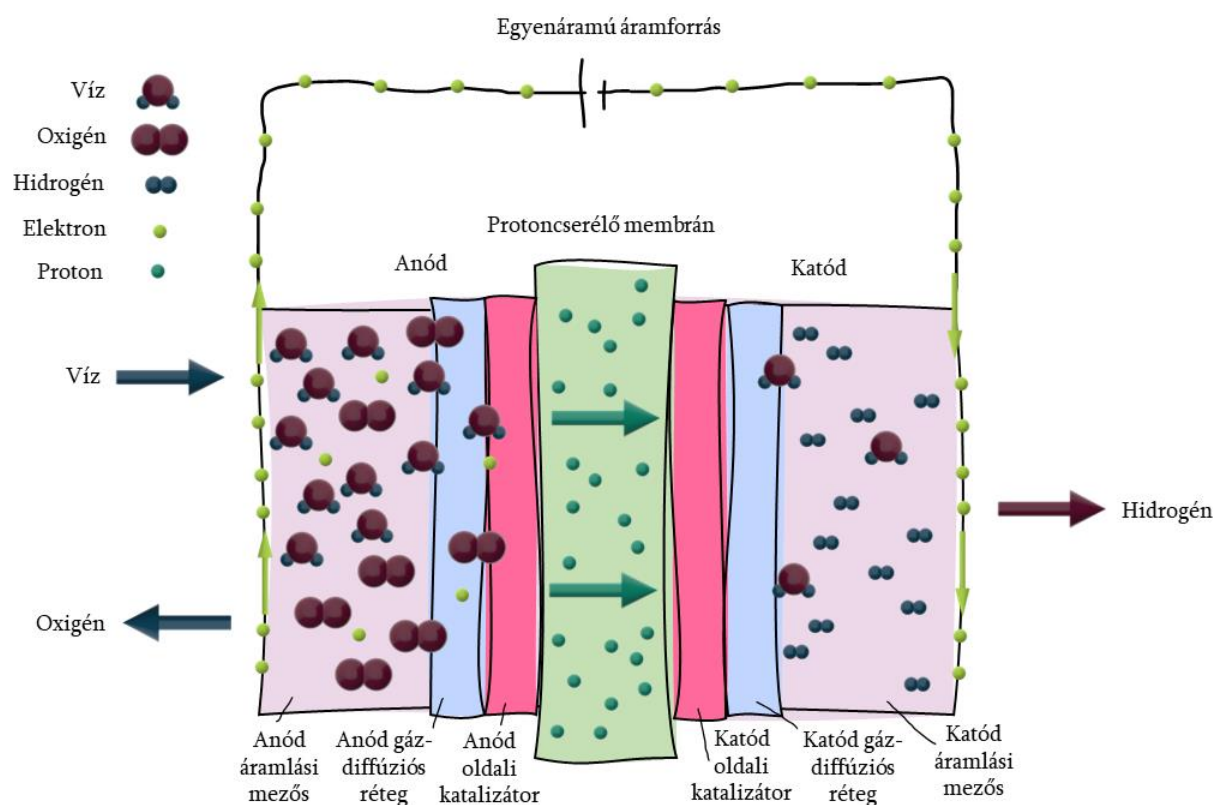
- alkálikus (lúgos) elektrolizálók,
- protoncserélő-membrános (PEM) elektrolizálók,
- magas hőmérsékletű elektrolizálók (HTE). A harmadik típusra olykor a 'szilárd-oxidos elektrolizálók' (SOE) kifejezést használják.

A jelenleg alkalmazott elektrolizálók nagy része alkálikus (KOH) elektrolizáló[65], mivel történelmileg ez a legkorábbi technológia. A PEM elektrolizálók most még kevésbé elterjedtek, de dinamikus fejlődést mutatnak napjainkban. Ezek tulajdonképpen a PEM tüzelőanyag-cellák fordított működésének felelnek meg. A magas hőmérsékletű (HTE) elektrolizálók inkább csak a jövő technológiáját képviselik, mert esetükben alapkutatásokra is szükség van még és egyelőre csak laboratóriumi méreteken léteznek.

Az elektrolizálók közös jellemzője, hogy a H_2 termelési kapacitás eléréséhez számos „elemi” cellát kapcsolnak össze, amelyek együttesen egy modult, úgynevezett stacket alkotnak, hasonlóan a tüzelőanyag-cellákhoz. A moduláris szerkezetnek köszönhetően több modul összekapcsolásával elvileg nagyobb rendszerek kiépítése is egyszerűen megvalósítható.

Alkálikus elektrolizáló: érett technológiának tekinthető. Alkálikus elektrolizálóknak valamilyen lúg, általában 30% körüli koncentrációjú kálium-hidroxid (KOH) oldat képezi az elektrolitot, mivel ez segíti az ionáramlást. Az alkálikus elektrolizálók DC bementre és LHV-ra vonatkoztatott hatásfoka valós működési körülmények között kb. 60-70%. Néhány tipikus működési paraméter: hőmérséklet 70-100 °C (az elektrolit hőmérsékletét tekintve); cellafeszültség 1,7-2,2 V; áramsűrűség 0,2-0,6 A/cm². Az előállított hidrogén tisztasága nagyjából 99,8%[65]. Az alkálikus elektrolizáló működéséhez megfelelnek az olcsóbb katalizátor anyagok is, mint például a nikkel.

PEM elektrolizáló: berendezések már 75-80% hatásfokkal működnek[65]. A PEM elektrolizálóban protoncserélő (PEM) membrán képezi az elektrolitot. Tulajdonképpen a PEM típusú tüzelőanyag-cella működésének fordított folyamataként működik.



9. ábra – PEM elektrolizáló sematikus ábrája

Szerkezeti felépítésében is nagyon hasonlít a PEM tüzelőanyag-cellához, de az oxigén-oldali korróziós problémák miatt inkább fém komponenseket használnak. Katalizátorként platinát vagy platinaötvözeteket. Eltérő továbbá a membrán (elektrolit) vastagsága. Felépítéséhez nemesfémek, így például a már említett platina szükséges.

Szilárd oxidos elektrolizáló: Az első két típus alacsony hőmérsékleten (<80-90°C) működik, míg a SOEL magas (>700°C)[66] hőmérsékleten működő elektrolizálóró. Ez a típus még nemigen terjedt el. A Harold Topsoe nevű dán vállalat, mely katalizátorokra, komplett vegyipari technológiákra, különösen ammónia-, metanol- és hidrogénelőállításra specializálódott, nemrég bejelentette, hogy egy viszonylag nagy kapacitású SOEL elektrolizáló gyártó üzemet készül megépíteni. A SOEL alapvetően ugyanúgy épül fel, mint a többi elektrolizáló, azaz elemi celláját egy anód, egy katód és egy elektrolit alkotja. Utóbbi egy kerámia anyag, amelynek igen magas (600-850 °C)[66] az üzemi hőmérséklete. A magas hőmérsékletű működés több előnnyel is jár: gyakorlatilag vízgőz elektrolízise történik, jobb reakciókinetikai, termodinamikai paraméterek érvényesülnek, így a fajlagos energiaigény alacsonyabb, azaz a SOEL hatásfoka magasabb (~90%)[66]. A magas üzemi hőmérsékletből adódó további előny, hogy nincs szükség drága katalizátor anyagokra, mint a PEM elektrolizáló esetében pl. a platinára, hanem bőségesen rendelkezésre álló és olcsó kerámiaanyagok, továbbá nikkel, cirkónium is megfelelőek, amelyek egy fém házban kerülnek elhelyezésre. Annyi kritikai megjegyzést azért tennem kell, hogy a legtöbb SOEL gyártó cég alapvető „adottságnak” tekinti a SOEL elektrolízishez szükséges hőforrás, ráadásul egy meglehetősen magas hőfokszintű hőforrás meglétét. Jó esetben ez a hő valamilyen hulladékhő formájában áll rendelkezésre. Nemigen szokták hangsúlyozni, hogy az említett, magas villamos hatásfok azért valósulhat meg a SOEL esetében, mert a szükséges energia egy részét hőként lehet bevinni a folyamatba, és így értelemszerűen kevesebb villamos energiát kell felhasználni. Másként fogalmazva a SOEL elektrolízis főként ott ideális megoldás, ahol nem csak nagyjából folyamatos hidrogéntermelésre van szükség, hanem ahol viszonylag jelentős mennyiségű hulladékhő is rendelkezésre áll.

8.3.1 Elektrolizálók hatásfoka

A víz elektrolízis hatásfokát számos tényező befolyásolja, a teljesség igénye nélkül ezek a következők: a hőmérséklet, a nyomás, az elektrolit típusa és koncentrációja, az elektród anyaga, kialakítása, valamint elhelyezkedése, a gázbuborékok távozásának sebessége, a szeparátor anyaga, és az alkalmazott feszültség időbeli alakulása[67].

A hatásfok növelésének érdekében továbbra is a költségcsökkentésen van a hangsúly. Ezt egyrészt nagy áramsűrűséget használó rendszerekkel, másrészt a feszültség időbeli romlásának minimalizálásával próbálják elérni.

Az elmúlt években az új elektrolíziskonstrukciók nagyon magas hatásfokról számoltak be, mint például a Hysata kapilláris technológiája (80%-os hatásfok, alsó fűtőértéket használva) és a Sunfire magas hőmérsékletű elektrolízisei (84%-os hatásfok, alsó fűtőértéket használva). Az elektrolízis elektromos hatásfoka tovább javítható, ha a bemenő energia egy részét külső forrásból származó hő formájában szolgáltatják. Ez különösen igaz a SOEC elektrolízisberendezésekre, amelyek a vizet magas hőmérsékletű gőz formájában használják[68].

8.3.2 Rekordot döntő hatásfok

Az ausztrál Hysata a korábban elért eredményeit felülmúlta. Egy kilogramm hidrogén 39,4 kWh energiát tartalmaz, míg előállítása a jelenlegi kereskedelmi forgalomban kapható elektrolizálókkal általában 52,5 kWh energiába kerül. A vállalat szerint az új, kapilláris táplálású elektrolíziscellája ezt az energiaköltséget 41,5 kWh-ra csökkenti, és ezzel megdönti a hatékonysági rekordokat, miközben a telepítése és az üzemeltetése is olcsóbb[69].

"A Hysata elektrolizáló teljes rendszerét úgy terveztük, hogy lehetővé tegye a lehető legegyszerűbb gyártást, méretezést és telepítést és 95 százalékos teljes rendszerhatékonyságot biztosítson" – mondta Gerry Swiegers, a vállalat technológiai igazgatója.

"A hidrogéngyártók számára ez jelentősen csökkenti a zöld hidrogén előállításának mind a tőke-, mind a működési költségeit"[69].

Swiegers a továbbiakban ezt az eszközt "az elektrolizátorok teljesen új kategóriájának nevezi, amely olyan monumentális, mint a belsőégésű motorokról az elektromos motorokra való áttérés"[69].

8.3.3 Elektrolizáló áramszükséglete

Az üzemanyag-cella hidrogén szükséglete tehát: 7,5 kg/h

Azt ugyebár tudjuk, hogy egy nap 24 órából (h) áll. Ha egész évben szeretnénk üzemeltetni a cellánk, akkor reálisan körülbelül 300 nap az, amivel ténylegesen számolnunk kell, ugyanis ilyenkor nem számoljuk bele a karbantartással és a használatból fakadó egyéb esetlegesen felmerülő problémákkal töltött időt. Így az üzemeléssel töltött idő (t) 7200 h/év. Ezekből megkapjuk, hogy az egy évre elegendő hidrogén mennyisége

$$\dot{m}_{\text{év}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{év}} \right) = \dot{m}_{\text{óra}} \cdot t \quad (37)$$

ahol

- $\dot{m}_{\text{év}}$, szükséges hidrogén mennyisége egy év alatt
- t pedig az üzemeléssel töltött órák száma.

Ami a mi esetünkben most

$$7,5 \text{ kg/h} \cdot 7200 \text{ h/év} = 54000 \text{ kg/év.} \quad (38)$$

Most lássuk, hogy ehhez az igényhez képest mit tud az elektrolizálónk. Az elektrolizálónk gáztermelő kapacitása $40 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (H_2) [árazatlan]. A hidrogén esetében a váltószám Nm^3 és kg között 0.08988 [<https://keengas.com/gases/hydrogen/>]. Így kiszámolható, hogy a $40 \text{ Nm}^3/\text{h}$ körülbelül $3,6 \text{ kg/h}$ -ás gáztermelő kapacitásnak felel meg. Ezt tudva egyszerűen kiszámolhatjuk, hogy egy év alatt

$$3,6 \text{ kg/h} \cdot 7200 \text{ h/év} = 25920 \text{ kg/év} \quad (39)$$

hidrogént tud előállítani.

Ezeket az adatokat összevetve megkapjuk, hogy ebből a típusú elektrolizálóból

$$\frac{54000 \text{ kg/év}}{25920 \text{ kg/év}} = 2,083 \rightarrow 3 \text{ db} \quad (40)$$

-ra van szükség ahhoz, hogy egy éven keresztül elegendő mennyiségű hidrogén álljon az üzemanyag-cella rendelkezésére.

Egy elektrolizáló teljesítménye 200 kW [61]. Ha ebből kettőre van szükségünk, akkor a kettőnek az összegét megszorozva az üzemidővel megkapjuk, hogy mekkora az energiaigényük. Azaz

$$E_{\text{szükséges}} = P_{\text{szükséges}} \cdot t \quad (41)$$

ahol

- $E_{\text{szükséges}}$, az elektrolizálók üzemeltetéséhez szükséges energia,
- t pedig az üzemeléssel töltött órák száma.

Tehát egy év alatt összesen

$$600 \text{ kW} \cdot 7200 \text{ h} = 4\,320\,000 \text{ kWh} = 4320 \text{ MWh} \quad (42)$$

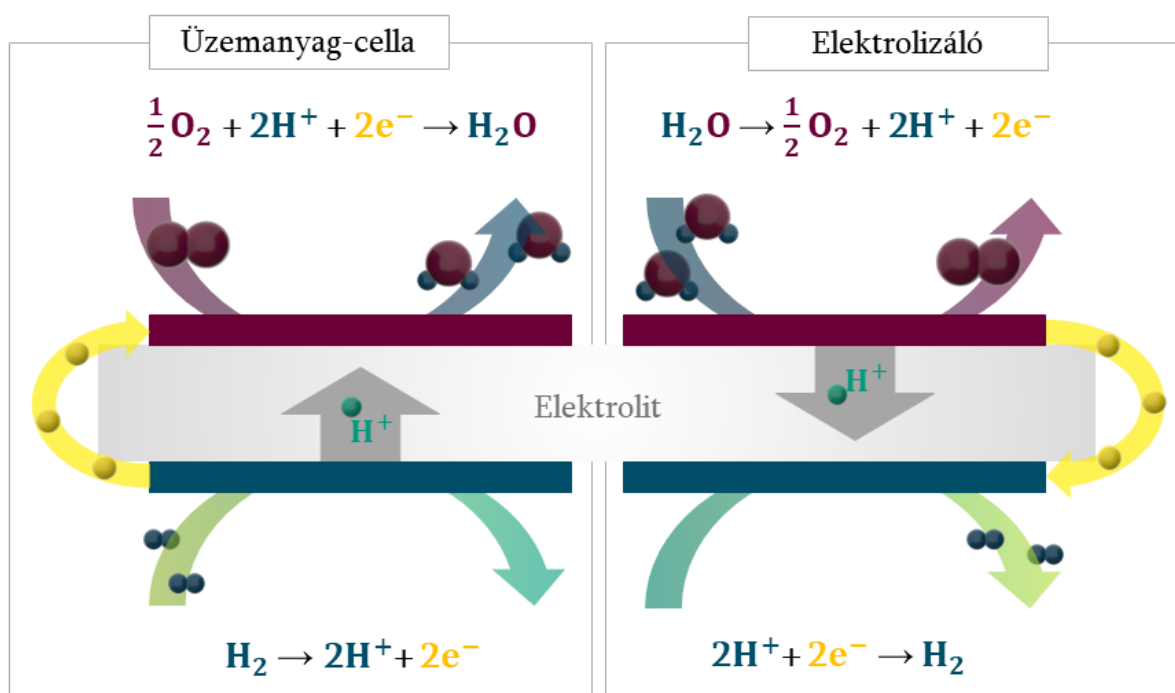
villamos energiára van szüksége a három elektrolizálónak.

8.4 Regeneratív üzemanyag-cellák

A regeneratív tüzelőanyag-cella (Unitised Regenerative Fuel Cell – URFC) olyan cella vagy cellaköteg, amely működhet üzemanyagcellaként (FC) vagy akár elektrolizálóként (E) is. E üzemmódban energiát szolgáltat a víz oxigénre és hidrogénre bontásához. A keletkezett hidrogént és oxigént eltárolják, hogy a regeneratív tüzelőanyag-cella FC üzemmódban áramtermelésre használja fel.

Ez a technológia nagy lehetőségeket rejt magában, ugyanis egyfajta megoldás lehet a megújuló energiarendszerekhez szükséges energia tárolására, mégpedig működőképes és fenntartható módon.

A technológia azonban még nem érett meg a kereskedelmi forgalomba hozatalra, mivel a teljesítménnyel, a tartóssággal és a költségekkel kapcsolatos kihívásokat még optimalizálni kell[70].



10. ábra – A hidrogén elektrokémiai égetése az üzemanyagcellában, és fordított folyamat az elektrolízisben. Mindkét folyamat történhet ugyanolyan típusú elektrokémiai reaktorban, amely protonvezető elektrolitot, elektródákat és megfelelő elektrokatalizátorokat tartalmaz.

8.5 Zöldhidrogén üzem

Zöld hidrogénként hivatkozunk arra a hidrogénre, melynek előállításához megújuló forrásokból származó villamos energiát használunk fel víz elektrolíziséhez, vagyis környezetbarát, karbonsemleges eljárással történik.

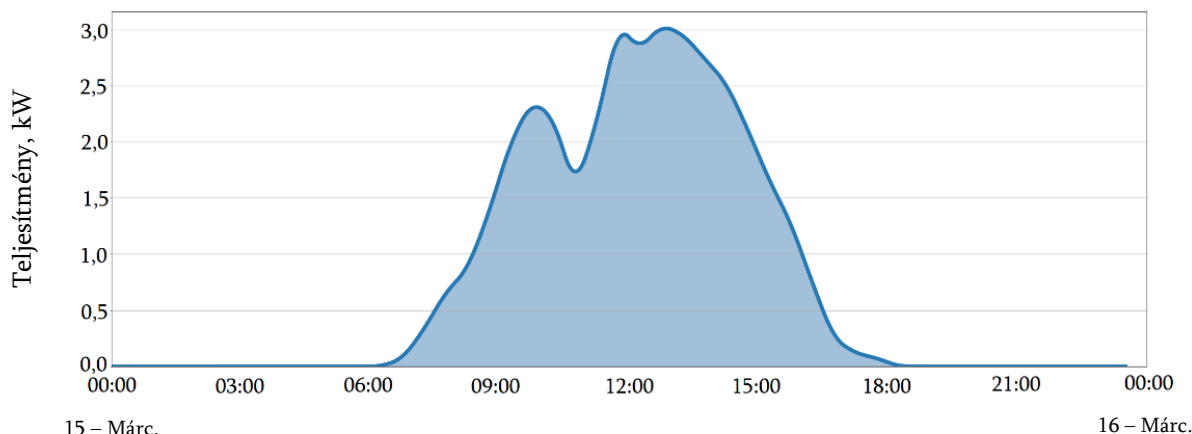
Megnéztük, hogy a hidrogén előállításához mennyi energiára van szükségünk. Ahhoz, hogy zöld hidrogénünk legyen, már csak azt kell megoldanunk, hogy az elektrolizálók megújuló energiaforrásból kapják az villamos energiát. Erre megoldást nyújt például a napenergia, a biomassa, a szélergia, a vízenergia, a tenger hullámozásából kinyerhető energia, a geotermikus energia és az árapály-energia. Nézzük meg hogyan tudjuk felhasználni a napenergiát hidrogén termeléshez.

A földet érő 1 órányi napsütés több energiát ad, mint amennyit az emberiség 1 év alatt elhasznál[71]. A megújuló energiaforrások tehát korlátlan mennyiségben állnak rendelkezésre, sosem fogynak el. Magyarországon a napsütéses órák átlagos száma egy évre vetítve eléri a 1900–2200-at, amely már kifejezetten magasnak számít az európai átlagot tekintve[72]. Ezek a számok azt jelentik, hogy az év minimum nyolc hónapjában, márciustól októberig napkollektorokkal és napelemekkel egy otthon számára szükséges energiamennyiség teljes egészét előállíthatjuk[72]. Olyan esetekben, amikor nagyléptékű rendszereket kell ellátnunk napenergiával, sok napelemet használnak rendszert alkotva, amelyeket együttesen napelem farmnak vagy más néven napelemparknak is nevezünk. A napelemparkok paneljei jóval nagyobb felületet fednek le, mint egy háztetőre épített napelemes rendszer, amely csak az adott épület villamosenergia-igényét hivatott fedezni. Egy napelem rendszer kiépítése komoly, hosszú távra szóló befektetés és elköteleződés a környezettudatos energia irányába.

8.5.1 Mennyi napenergiára van szükség?

A névleges teljesítmény és a termelt energiamennyiség közt a kihasználási tényező teremti kapcsolatot. A kihasználási tényező egy adott időszakban ténylegesen megtermelt, és az elméletileg maximálisan megtermelhető energia hányadosa. Az elméletileg megtermelhető maximális energiát úgy számítjuk, hogy a napelemfarm névleges teljesítményét megszorozzuk a vizsgált időszak teljes hosszával, tehát azt feltételezzük, hogy az erőmű végig csúcsteljesítményen üzemel. Egy 50%-os kihasználási tényező tehát jelentheti azt is, hogy a napelemfarm végig a névleges teljesítménye felét állította elő, de azt is, hogy az idő felében csúcsteljesítményen, a másik felében pedig egyáltalán nem üzemelt[73]. A gyakorlatban természetesen mindig ez a két véglet közti állapot fordul elő.

Állandó teljesítmény esetén az energia egyszerűen a teljesítmény és az idő szorzataként számítható. Egy napelemes rendszer esetében a leadott teljesítmény azonban folyamatosan változik az időjárási körülmények függvényében, ezért a termelt energia a teljesítmény időfüggvényének ábrázolásakor a görbe alatti terület nagyságával arányos.



11. ábra – Egy háztartási napelemes rendszer jellemző napi teljesítmény lefutása (kék görbe) és az adott napon megtermelt energia (görbe alatti terület)[73]

A megújuló energiaforrásokon alapuló erőművek esetében azonban alapvetően más a helyzet, mivel itt a megtermelhető energia mennyiségét nem az üzemeltetési stratégia és a piaci árak, hanem az időjárás alakulása határozza meg. A napenergia a legalacsonyabb kihasználási tényezővel rendelkező megújuló energia (Magyarországon napjainkban 15-17%[74]), ami több hatás együttes eredménye:

- az év felében (éjszaka) egyáltalán nem termelnek,
- a légkör és a sugárzás beesési szöge miatt a napközbeni változását is egy fokozatos felfutás és csökkenés jellemzi,
- a borús időben jelentősen csökken a teljesítmény,
- a névleges termelés egy irreálisan kedvező állapotra vonatkozik (1000 W/m^2 sugárzás és 25°C cellahőmérséklet, ami a valóságban csak igen ritkán fordul elő[73]).

Most nézzük meg, hogy mindezeket tudva mekkora beépített teljesítményre van szüksége a napelemparkunknak. Az erőművek névleges, beépített teljesítménye azt mutatja meg, hogy a tervezési körülmények között mekkora teljesítményt képes előállítani az erőmű. Ez az érték határozza meg az erőmű méretét és beruházási költségét, és ez határolja be a működése során kiadható pillanatnyi teljesítményt is. Az erőmű bevételei azonban a megtermelt energiából származnak. Ehhez segítségünkre lesz a következő képlet

$$E_{\text{szükséges}} = P_{\text{név}} \cdot t \cdot \eta \quad (43)$$

ahol

- $P_{\text{név}}$, a napelempark beépített teljesítménye,
- η pedig a kihasználási tényező.

Ezt a képletet átalakítva megkapjuk, hogy mekkora teljesítményű napelemparkra van szükségünk.

$$P_{\text{név}}(\text{kW}) = \frac{E_{\text{szükséges}}(\text{kWh})}{t(\text{h}) \cdot \eta(\%) } \quad (44)$$

Azaz

$$\frac{4\,320\,000 \text{ kWh}}{7200 \text{ h} \cdot 0,16 \%} = 3750 \text{ kW} \approx 4 \text{ MW} \quad (45)$$

névleges teljesítményű napelemparkra van szükségünk.

Fontosnak tartom megemlíteni, hogy 1 MW napenergia előállításához körülbelül 2 hektár földterületnyi napelemre van szükség[75].

8.5.2 Hogyan működik egy zöldhidrogén üzem?

A naperőmű nappal folyamatosan állít elő elektromos áramot, ami felhasználható a vízelektrolizáló cella elektromos ellátására. A lehetséges kapcsolások energiahatékonyságát vizsgálják és optimalizálják.

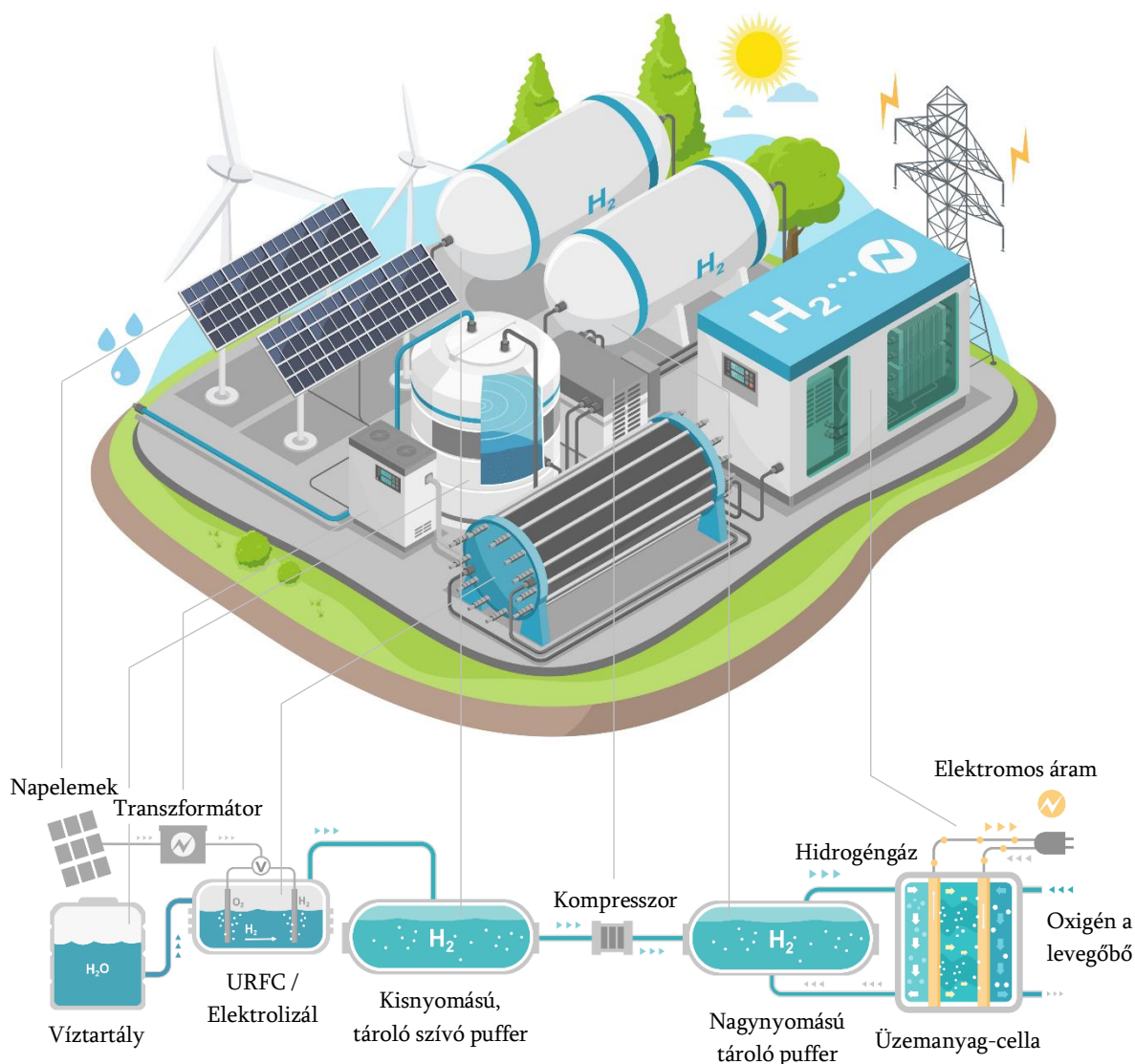
Az elektrolizáló cella hálózati üzemeltetése során a váltófeszültséget egy nagyteljesítményű tápegységbe vezetik, amely az elektrolízishez szükséges egyenfeszültséggé tudja átalakítani azt.

Az elektrolizáló cella optimális működtetéséhez az egyenáramot transzformátor alakítja megfelelő feszültségűvé. Közvetlenül az elektrolizáló cellára kapcsolva annak működését további tápegység beépítése nélkül, a transzformátorral szabályozzák.

Az elektrolizáló cella tiszta víz elektrolízisével állít elő hidrogént és oxigént. A cella széles tartományú dinamikus működésre képes, így nem okoz problémát a naperőmű leadott teljesítményének gyors változása (pl. felhősödés). Az elektrolízis melléktermékét, a tiszta oxigént elválasztják a víztől, és a légkörbe engedik vagy bizonyos esetekben tartályokban tárolják.

A hidrogén nedvességtartalmát eltávolítva a gázt egy kisnyomású pufferbe vezetik, majd kompresszor segítségével nagynyomású tartályokba töltik.

Az eltárolt hidrogént később üzemanyag-cellák segítségével elektromos árammá alakíthatjuk környezetszennyezés nélkül.



12. ábra – Zöldhidrogén üzem vázlatos ábrája

9 Befejezés

Azt ugyebár mindannyian halljuk rendszeresen, hogy fenntarthatóságra kell törekedünk, de mit is jelent pontosan a fenntarthatóság? A szó az elmúlt években vált igen népszerűvé, azonban gyökerei ennél jóval mélyebbre nyúlnak vissza. Az Egyesült

Nemzetek Szervezetének (ENSZ) 1987-es „Közös jövőnk” elnevezésű jelentésében szerepelt először a kifejezés. A fenntarthatóság fogalmát az alábbi módon definiálták[76]:

„A fenntarthatóság az emberiség jelen szükségleteinek kielégítése, a környezet és a természeti erőforrások jövő generációk számára történő megőrzésével együtt.”

Azonban, ahogy a kifejezés egyre divatosabbá vált, úgy lett jelentése is egyre ködösebb. Manapság a különböző cégek és szervezetek lépten-nyomon odateszik egy-egy szó elé, csak hogy „zöldebbnek” tűnjön tevékenységük. Ezzel párhuzamosan a kifejezés eredeti célja és jelentése egyre jobban elhomályosodik.

A fenntarthatóságnak három pillére van: a társadalom, a környezet és a gazdaság. Földünk népessége – azaz a társadalom – folyamatosan növekszik, és fejlődik, amivel a gazdaságnak lépést kell tartania. Azonban a környezet önerejéből nem képes a másik két dimenziót követni, ez a mi – az emberiség – felelősségünk lett.

A legegyszerűbben egy háromlábú székhez lehetne hasonlítani a kifejezést. Csak akkor lesz egyensúlyban a rendszer – azaz a Földünk –, ha a fenntarthatóság három pillére egymással párhuzamosan, azonos mértékben fejlődik. A fejlődés elkerülhetetlen, ezért a fenntarthatóság kifejezés is ennek függvényében változott meg a köznyelvben, és egybe olvadt a fenntartható fejlődéssel, aminek a fogalma a következő[76]:

„A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely úgy elégíti ki a jelen nemzedékek szükségleteit, hogy az nem sérti az elkövetkező generációk lehetőségét, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket.”

Annak érdekében, hogy helyre billentsük az egyensúlyt 3 alapelvet határoztak meg, aminek ha eleget teszünk, akkor helyre megvalósulhat a fenntarthatóság.

- **Az, amit a környezetbe bocsátunk nem, haladhatja meg a természet befogadó és feldolgozó képességét.** Sajnos a jelenlegi tendenciák alapján ettől messze állunk. Károsanyag-kibocsátásunk évről évre növekszik, miközben Földünk kapacitását már régen túlléptük.
- **Az, amit a környezetből kitermelünk, nem haladhatja meg a környezet újratermelő képességét.** Jelenleg ez nincs egyensúlyban. Gondoljunk csak az erdőirtásra vagy a túlhalászatra.
- **A nem-megújuló erőforrások felhasználásának mértéke nem haladhatja meg azt az ütemet, amilyen arányban helyettesíteni tudjuk őket megújuló erőforrásokkal.** Ezen a területen a legjobbak a kilátásaink. 2019-ben az elektromos áram kapacitás növekedésének több, mint 80 százaléka mögött megújuló energiaforrás áll. Ennek

köszönhetően fosszilis és megújuló energiaforrások aránya évről évre látványosan javul. A tendenciák alapján 2033-ra az elektromos áram előállítás több, mint felét megújuló forrásból fogjuk fedezni

Ha a fenntarthatóság alapelvei meg is valósulnak, az még nem jelent egyet azzal, hogy fejlődünk is, mivel ez csak egy egyensúlyi helyzetet eredményez. Ahogy korábban említettük, a népesség folyamatosan növekszik, amit a gazdaságnak követni kell. Ezen nem változtathatunk. Azonban, **ha környezetünk lemarad, annak beláthatatlan következményei lesznek** bolygónkra, ami által számunkra is.

Évről évre egyre több intő jel mutat arra, hogy a fenntarthatóság veszélybe került. Gondoljunk az éghajlatváltozásra, az elsivatagosodásra, bolygónk biodiverzitásának látványos csökkenésére vagy akárcsak arra, hogy nem olyan rég került az amerikai tőzsdére a víz, egyenesen a kőolaj és az arany mellé.

Ahhoz, hogy a fenntartható fejlődés részesei legyünk remek lehetőségeket rejt magában a zöldhidrogén termelés és az üzemanyagcellák használata. Mind a megújuló, mind pedig a fosszilis energiahordozókból előállított energia esetében fontos szempont a megtermelt energia tárolása. A napenergia által előállított hidrogén nagy előnye, hogy a napenergiával ellentétben a hidrogén tárolható, így az időjárási viszonyoktól függetlenül bármikor rendelkezésre áll. Habár mi most elsősorban a hidrogénnel üzemelő tüzelőanyag-cellákat vizsgáltuk meg jobban, de láthattuk, hogy különféle anyagok felhasználásával képesek működni. Habár ma még inkább kisléptékű alkalmazásuk a jellemző, sokan törekednek arra, hogy a jövőben a kisebb hordozható műszaki cikkektől kezdve, a háztartásokon keresztül, egészen a legnagyobb járművekig, az élet számos területén segítségünkre legyenek.

Magyarországon jelenleg is zajlanak különféle projektek, amelyek a fenntarthatóságra törekсенek. Ezek közül néhány:

Power-to-Gas Hungary Kft. – A Power-to-Gas Hungary Kft. egy innovatív start-up vállalkozás, amely egy olyan forradalmi technológiát fejleszt és forgalmaz, amely hatékonyan alakítja át a szén-dioxidot metánná, a földgáz fő összetevőjévé. A Power-to-Gas Hungary Kft. villamos energiát, szén-dioxidot és vizet használva, olyan minőségű megújuló földgázt fog előállítani, amelyet közvetlenül betáplálhat a meglévő földgáz-infrastruktúrába[77].

Akvamarin Projekt – A Magyar Földgáztároló Zrt. egy megközelítőleg 2,5 megawatt (MW) összteljesítményű elektrolizáló rendszert és a hozzá tartozó hidrogén gázelőkészítő technológiát létesített a kardoskúti földalatti gáztárolónál. A rendszer felépítése jelentős energiátárolással kapcsolatos innováció, ami hozzájárul a

villamosenergia-rendszer kiegyensúlyozásához is. Az elektrolizáló berendezés működtetésével biztosítható, hogy a megújuló energiaforrás „kikapcsolása” helyett a felesleges többlet villamos energia felhasználásával vízbontáson keresztül hidrogén álljon elő. Az így előállított hidrogént a tervek szerint földgázzal keverve a Magyar Földgáztároló Zrt. gázzal működő berendezéseiben használják fel, csökkentve ezzel a szén-dioxid kibocsátást. Emellett szigorúan betartva a gázminőségi előírásokat, a szállítórendszeren keresztül a végfogyasztókhoz is eljuttatható lesz[78].

Nemzeti Hidrogénstratégia – A stratégia szerint a hidrogént növekvő arányban állítanák elő karbonszegény és karbonmentes módon. A karbonszegény módszerrel a hidrogént hagyományos módon (földgázból vagy szénből) gyártják, de a keletkező szén-dioxidot nem engedik ki a légkörbe, hanem valahol – általában a föld alatt – eltárolják. Ez a kék hidrogén. A karbonmentes módszer során jellemzően megújuló energia segítségével végzett vízbontással készülne a zöld hidrogén. A stratégia szerint a fenti két módszerrel előállított hidrogénnel a petrokémiában és a vegyiparban (kőolajfinomítás, ammónia-előállítás, műtrágyagyártás) csökkenthető a szén-dioxid-kibocsátás. A tervek szerint Magyarországon 2030-ig **két hidrogén völgyet** terveznek kialakítani. Dunaújváros és Pécs között, illetve Miskolc térségében, hisz ez utóbbi helyen jelen van a nehézipar, és itt kicsiben tudnák a hidrogén ipari felhasználását tesztelni. Része a stratégiának a **közlekedés hidrogéneseítése** is, elsősorban nehézgépjárművekre fókuszálva. Konkrétan üzemanyagcellával hajtott városi buszokról és kukásautókról, illetve a “Zöld Kamion” projektről van szó. 2030-ig 20 darab hidrogén töltőállomást terveznek telepíteni, és 4800 hidrogénes járművel számolnak[79].

Bükkábrányi Energiapark – Bükkábrányban üzemel Magyarország egyik legnagyobb napelemparkja. A park csaknem 65 000 db polikristályos napelemet működtet összehangoltan, rendszerbe szervezve, csúcsteljesítménye pedig meghaladja a 22MWp-t. A jól bevált technológián és rutinszerűen alkalmazott műszaki tudáson túl a Bükkábrányi Energiaparkban új, eddig hazai szinten még nem alkalmazott műszaki megoldásokkal törekszenek kollégáink az előttünk álló klímavédelmi törekvések hazai megvalósítására. Konkrét célunk, a hidrogén energetikai és közlekedési célú felhasználásának elősegítése. Terveink szerint 2023-ban üzembe állítjuk az ország első, tisztán zöldhidrogént termelő, 1 MW-os névleges teljesítményű, PEM-elektrolizáló berendezését. A víz elektrolízise során hidrogén és oxigén keletkezik, ami egy jól ismert folyamat, azonban az elektrolízishez szükséges energiát a Bükkábrányi Energiaparkban tisztán napelemek – így 100 % -ban karbonmentes – segítségével állítják elő. Azon túl, hogy az előállított hidrogén teljes mértékben karbonsemleges, a szakembereknek további innovációs törekvése, hogy a napelempark és a hidrogéngyártás üzemvitele szervesen kapcsolódjon össze, majd új algoritmusok által az időjárásból eredő bizonytalanságok hatása csökkenthető legyen, ezáltal növelni lehessen a villamosenergia-rendszer biztonságát.

A Bükkábrányi Energiapark azért is egyedülálló, mert ekkora egységteljesítménnyel hazai szinten még senki sem kísérletezett, s így ipari szinten valósulhat meg a „power-to-gas” technológia[80].

A teljesség igénye nélkül további magyar cégek és vállalatok, amelyek rendelkeznek fenntarthatósági stratégiával: Sole-Mizo Zrt., RAKUN Kft., MÁV-csoport, E.ON Hungária[81].

„A legtöbb tudományos kutatás mindössze továbbfejleszti meglévő tudásunkat. Nagyon kis része a tudománynak az, ami alapvetően újat hoz, ami "bolondságos" tudomány. Bár a legtöbb szokatlan ötlet sohasem valósul meg, de ami igen, az nagy ugrást jelent az emberiség fejlődésében.” – Oláh György

10 Conclusion

We all hear regularly that we should strive for sustainability, but what exactly does sustainability mean? The word has become very popular in recent years, but its roots go back much deeper than that. The term was first used in the 1987 United Nations (UN) report 'Our Common Future'. The concept of sustainability was defined as follows[76]:

"Sustainability is meeting the needs of humanity today, while preserving the environment and natural resources for future generations."

However, as the term has become more fashionable, its meaning has also become more obscure. Nowadays, companies and organisations are adding it to a word at every turn, just to make their activities seem "greener". At the same time, the original purpose and meaning of the term is becoming increasingly obscured.

Sustainability has three pillars: society, environment and economy. The population of our planet - society - is constantly growing and evolving, and the economy must keep pace. However, the environment cannot keep up with the other two dimensions on its own, and this has become our - humanity's - responsibility.

The simplest way to describe the term is a three-legged stool. The system - our Earth - will only be in balance if the three pillars of sustainability evolve in parallel and at the same rate. Development is inevitable, and the term sustainability has therefore changed in the vernacular and merged with sustainable development, which is defined as follows[76]:

"Sustainable development is development that meets the needs of present generations without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

In order to redress the balance, 3 principles have been identified, which, if met, can restore sustainability.

- **What we release into the environment cannot exceed nature's capacity to absorb and process.** Unfortunately, current trends suggest that we are far from that. Our emissions of pollutants are increasing year on year, while we have long exceeded the Earth's capacity.
- **What we extract from the environment must not exceed the environment's capacity to reproduce.** At the moment, this is out of balance. Think of deforestation or overfishing.
- **The rate of use of non-renewable resources must not exceed the rate at which we can replace them with renewable resources.** In 2019, more than 80 per cent of electricity capacity growth will be driven by renewables. As a result, the ratio of fossil to renewable energy sources is improving dramatically year on year. Trends suggest that by 2033, more than half of electricity generation will come from renewable sources.

Even if the principles of sustainability are being implemented, this does not mean that we are developing, as this only leads to a situation of equilibrium. As mentioned earlier, the population is constantly growing and the economy has to follow. We cannot change that. However, **if our environment lags behind, it will have unforeseeable consequences** for our planet, and therefore for us.

Every year, there are more and more warning signs that sustainability is under threat. Think of climate change, desertification, the spectacular loss of biodiversity on our planet, or even the recent addition of water to the US stock market, right alongside oil and gold.

To be part of sustainable development, there are great opportunities for green hydrogen production and the use of fuel cells. For both renewable and fossil energy, the storage of the energy produced is an important aspect. A major advantage of solar hydrogen is that, unlike solar energy, hydrogen can be stored and is available at any time, regardless of weather conditions. Although we have focused on hydrogen fuel cells, we have seen that they can be used with a variety of materials. Although they are still used on a small scale today, many of them are aiming to help us in the future in many areas of life, from small portable technical items, through households, to the largest vehicles.

There are various projects currently underway in Hungary that aim to promote sustainability. Some of them are:

Power-to-Gas Hungary Kft. - Power-to-Gas Hungary Kft. is an innovative start-up company that develops and markets a revolutionary technology that efficiently converts carbon dioxide into methane, the main component of natural gas. Using electricity, carbon dioxide and water, Power-to-Gas Hungary Kft. will produce renewable natural gas of a quality that can be directly fed into the existing natural gas infrastructure[77].

Akvamarin Project - Hungarian Gas Storage Ltd. has installed an approximately 2.5 megawatt (MW) electrolysis system and associated hydrogen gas pre-processing technology at the Kardoskút underground gas storage facility. The design of the system is a major energy storage innovation that will also contribute to balancing the electricity system. The operation of the electrolysis equipment ensures that hydrogen is produced through water decomposition rather than "turning off" the renewable energy source by using excess electricity. The hydrogen produced is planned to be mixed with natural gas and used in the gas-fired facilities of the Hungarian Gas Storage Company, thus reducing carbon dioxide emissions. It will also be available to final consumers through the transmission system, in strict compliance with gas quality standards[78].

National Hydrogen Strategy - The strategy calls for an increasing share of hydrogen to be produced in low and zero carbon ways. In the low-carbon method, hydrogen is produced conventionally (from natural gas or coal), but the resulting carbon dioxide is not released into the atmosphere but stored somewhere, usually underground. This is blue hydrogen. In the carbon-free method, green hydrogen would typically be produced by water decomposition using renewable energy. The strategy is to use the hydrogen produced by these two methods to reduce carbon emissions in the petrochemical and chemical industries (petroleum refining, ammonia production, fertiliser production). Two hydrogen valleys are planned to be developed in Hungary by 2030. One between Dunaújváros and Pécs, and the other in the Miskolc area, where heavy industry is present and where the industrial use of hydrogen could be tested on a small scale. Part of the strategy is also the hydrogenisation of transport, with a focus on heavy vehicles. Specifically, fuel cell city buses and refuse collection vehicles, and the "Green Truck" project. 20 hydrogen charging stations are planned to be installed by 2030, and 4,800 hydrogen vehicles are expected[79].

Bükkábrány Energy Park - One of the largest solar parks in Hungary is located in Bükkábrány. The park has almost 65 000 polycrystalline solar panels operating in a coordinated system with a peak capacity of over 22MWp. In addition to proven technology and routinely applied technical knowledge, our colleagues at the Bükkábrány Energy Park are striving to implement the climate protection ambitions ahead of us in Hungary with new technical solutions that have not yet been applied at the domestic level. Our concrete goal is to promote the use of hydrogen for energy and transport

purposes. In 2023, we plan to commission the country's first PEM electrolysis plant producing pure green hydrogen with a nominal capacity of 1 MW. Electrolysis of water produces hydrogen and oxygen, a well-known process, but the energy for electrolysis in the Bükkábrány Energy Park will be produced using pure solar panels, which are 100% carbon-free. In addition to the fact that the hydrogen produced is completely carbon neutral, a further innovation objective of the experts is to link the solar park and the hydrogen production operations in an integrated way, and to reduce the impact of uncertainties due to weather conditions by using new algorithms, thereby increasing the security of the electricity system.

The Bükkábrány Energy Park is also unique in that no one has ever experimented with such a large unit capacity at national level, thus enabling the implementation of power-to-gas technology on an industrial scale[80].

Other Hungarian companies and enterprises with a sustainability strategy include Sole-Mizo Zrt, RAKUN Kft, MÁV Group, E.ON Hungária[81].

"Most scientific research is just an extension of our existing knowledge. A very small part of science is that which is fundamentally new, which is 'foolish' science. Although most unconventional ideas never materialise, those that do represent a great leap forward in the development of mankind." - György Oláh

Irodalomjegyzék

- [1] N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu, “‘Green’ path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 23, pp. 6804–6839, Dec. 2008, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2008.08.054.
- [2] L. Weger, A. Abánades, and T. Butler, “Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 720–731, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.029.
- [3] D. Mahajan, C. E. Taylor, and G. A. Mansoori, “An introduction to natural gas hydrate/clathrate: The major organic carbon reserve of the Earth,” *J Pet Sci Eng*, vol. 56, no. 1–3, pp. 1–8, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.PETROL.2006.09.006.
- [4] S. Postels, A. Abánades, N. von der Assen, R. K. Rathnam, S. Stückrad, and A. Bardow, “Life cycle assessment of hydrogen production by thermal cracking of methane based on liquid-metal technology,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 48, pp. 23204–23212, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2016.09.167.
- [5] U. Bossel, “Does a hydrogen economy make sense?,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 10, pp. 1826–1836, 2006, doi: 10.1109/JPROC.2006.883715.
- [6] B.E. Logan, “Extracting hydrogen from electricity and renewable resources”.
- [7] M. Schroepe, “Which way to energy utopia?,” *Nature*, vol. 414, no. 6865, pp. 682–684, Dec. 2001, doi: 10.1038/414682A.
- [8] N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu, “From hydrocarbon to hydrogen–carbon to hydrogen economy,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 3, pp. 225–237, Mar. 2005, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2004.03.033.
- [9] P. Tang, Q. Zhu, Z. Wu, and D. Ma, “Methane activation: The past and future,” *Energy Environ Sci*, vol. 7, no. 8, pp. 2580–2591, 2014, doi: 10.1039/C4EE00604F.
- [10] M. Sevilla and R. Mokaya, “Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage,” *Energy Environ Sci*, vol. 7, no. 4, pp. 1250–1280, Mar. 2014, doi: 10.1039/C3EE43525C.
- [11] A. G. Pandolfo and A. F. Hollenkamp, “Carbon properties and their role in supercapacitors,” *J Power Sources*, vol. 157, no. 1, pp. 11–27, Jun. 2006, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2006.02.065.
- [12] “A MEGÚJULÓ HIDROGÉN”.

- [13] D. Gielen, D. Saygin, E. Taibi, and J. P. Birat, "Renewables-based decarbonization and relocation of iron and steel making: A case study," *J Ind Ecol*, vol. 24, no. 5, pp. 1113–1125, Oct. 2020, doi: 10.1111/JIEC.12997.
- [14] "Előállítás, elektrolízis • HFC Hungary." <https://www.hfc-hungary.org/elektrolizis/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [15] Y. N. Wang and A. E. Rodrigues, "Hydrogen production from steam methane reforming coupled with in situ CO₂ capture: Conceptual parametric study," *Fuel*, vol. 84, no. 14–15, pp. 1778–1789, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.FUEL.2005.04.005.
- [16] A. Milbrandt and M. Mann, "Hydrogen Resource Assessment: Hydrogen Potential from Coal, Natural Gas, Nuclear, and Hydro Power," 2009. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [17] T. Koch Blank and P. Molly, "Hydrogen's Decarbonization Impact for Industry Near-term challenges and long-term potential," 2020. [Online]. Available: www.rmi.org
- [18] M. S. Liao and Q. E. Zhang, "Dissociation of methane on different transition metals," *J Mol Catal A Chem*, vol. 136, no. 2, pp. 185–194, Dec. 1998, doi: 10.1016/S1381-1169(98)00050-8.
- [19] R. Aiello, J. E. Fiscus, H. C. Zur Loye, and M. D. Amiridis, "Hydrogen production via the direct cracking of methane over Ni/SiO₂: Catalyst deactivation and regeneration," *Appl Catal A Gen*, vol. 192, no. 2, pp. 227–234, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0926-860X(99)00345-2.
- [20] T. Zhang and M. D. Amiridis, "Hydrogen production via the direct cracking of methane over silica-supported nickel catalysts," *Appl Catal A Gen*, vol. 167, no. 2, pp. 161–172, Feb. 1998, doi: 10.1016/S0926-860X(97)00143-9.
- [21] N. Z. Muradov, "CO₂-Free Production of Hydrogen by Catalytic Pyrolysis of Hydrocarbon Fuel," *Energy & Fuels*, vol. 12, no. 1, pp. 41–48, 1998, doi: 10.1021/EF9701145.
- [22] N. Z. Muradov, "How to produce hydrogen from fossil fuels without CO₂ emission," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 211–215, Mar. 1993, doi: 10.1016/0360-3199(93)90021-2.
- [23] E. K. Lee *et al.*, "Catalytic decomposition of methane over carbon blacks for CO₂-free hydrogen production," *Carbon N Y*, vol. 42, no. 12–13, pp. 2641–2648, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.CARBON.2004.06.003.

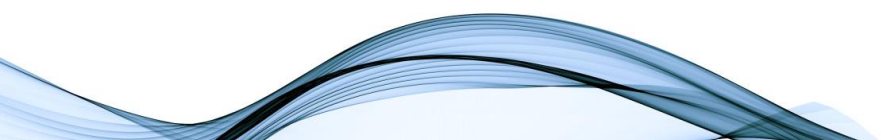
- [24] N. Muradov, "Catalysis of methane decomposition over elemental carbon," *Catal Commun*, vol. 2, no. 3–4, pp. 89–94, Jul. 2001, doi: 10.1016/S1566-7367(01)00013-9.
- [25] J. D. Holladay, J. Hu, D. L. King, and Y. Wang, "An overview of hydrogen production technologies," *Catal Today*, vol. 139, no. 4, pp. 244–260, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.CATTOD.2008.08.039.
- [26] T. Abbasi and S. A. Abbasi, "Decarbonization of fossil fuels as a strategy to control global warming," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1828–1834, May 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2010.11.049.
- [27] N. Shah, D. Panjala, and G. P. Huffman, "Hydrogen Production by Catalytic Decomposition of Methane," *Energy & Fuels*, vol. 15, no. 6, pp. 1528–1534, Nov. 2001, doi: 10.1021/EF0101964.
- [28] T. Geißler *et al.*, "Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed," *Chemical Engineering Journal*, vol. 299, pp. 192–200, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.04.066.
- [29] Y. Ogino, "Catalysis by Molten Metals and Molten Alloys," <http://dx.doi.org/10.1080/03602458108079644>, vol. 23, no. 4, pp. 505–551, Jan. 2007, doi: 10.1080/03602458108079644.
- [30] Y. Saito, F. Miyashita, and Y. Ogino, "Studies on catalysis by molten metal: VI. Kinetics and the reaction scheme for the dehydrogenation of isopropyl alcohol over the liquid indium catalyst," *J Catal*, vol. 36, no. 1, pp. 67–73, Jan. 1975, doi: 10.1016/0021-9517(75)90010-X.
- [31] A. Miyamoto and Y. Ogino, "Studies on catalysis by molten metal. V. Kinetics of the dehydrogenation of sec-butyl alcohol over the liquid indium catalyst," *J Catal*, vol. 27, no. 2, pp. 311–321, Nov. 1972, doi: 10.1016/0021-9517(72)90274-6.
- [32] A. Miyamoto, K. Okano, and Y. Ogino, "Studies on the catalysis by molten metal: VII. A simple MO treatment on the dehydrogenation of alcohols and amines over the molten metal," *J Catal*, vol. 36, no. 3, pp. 276–284, Mar. 1975, doi: 10.1016/0021-9517(75)90037-8.
- [33] A. Miyamoto and Y. Ogino, "Studies on the catalysis by the molten metal: IX. A comparison between the isotope effect of two-dimensional dehydrogenation and the isotope effect of three-dimensional dehydrogenation of methyl alcohol," *J Catal*, vol. 41, no. 2, pp. 212–217, Feb. 1976, doi: 10.1016/0021-9517(76)90336-5.

- [34] A. Miyamoto and Y. Ogino, "Studies on the catalysis by the molten metal. VIII. Kinetic isotope effects measured by using a pulse reaction technique," *J Catal*, vol. 37, no. 1, pp. 133–141, 1975, doi: 10.1016/0021-9517(75)90142-6.
- [35] A. Miyamoto and Y. Ogino, "Studies on catalysis by molten metals: X. Hydrogen transfer reactions between alcohols and ketones on liquid indium catalyst," *J Catal*, vol. 43, no. 1–3, pp. 143–153, Jun. 1976, doi: 10.1016/0021-9517(76)90301-8.
- [36] C. J. Nagel, C. A. Chanenchuk, E. W. Wong, and R. D. Bach, "Catalytic Extraction Processing: An Elemental Recycling Technology," *Environ Sci Technol*, vol. 30, no. 7, pp. 2155–2167, Jul. 1996, doi: 10.1021/ES9505457.
- [37] "Molten metal decomposition apparatus," Dec. 1993.
- [38] M. Steinberg, "Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 24, no. 8, pp. 771–777, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0360-3199(98)00128-1.
- [39] M. Steinberg, "Production of hydrogen and methanol from natural gas with reduced CO₂ emission," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 419–425, Jun. 1998, doi: 10.1016/S0360-3199(97)00092-X.
- [40] M. Serban, M. A. Lewis, C. L. Marshall, and R. D. Doctor, "Hydrogen production by direct contact pyrolysis of natural gas.," *Energy Fuels*, vol. 17, no. 3; May/Jun. 2003, pp. 705–713, May 2003, doi: 10.1021/EF020271Q.
- [41] M. Plevan *et al.*, "Thermal cracking of methane in a liquid metal bubble column reactor: Experiments and kinetic analysis," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 8020–8033, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2015.04.062.
- [42] B. Parkinson, J. W. Matthews, T. B. McConnaughey, D. C. Upham, and E. W. McFarland, "Techno-Economic Analysis of Methane Pyrolysis in Molten Metals: Decarbonizing Natural Gas," *Chem Eng Technol*, vol. 40, no. 6, pp. 1022–1030, Jun. 2017, doi: 10.1002/CEAT.201600414.
- [43] D. C. Upham *et al.*, "Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon," *Science*, vol. 358, no. 6365, pp. 917–921, Nov. 2017, doi: 10.1126/SCIENCE.AAO5023.
- [44] "Hydrogen Recovery by Pressure Swing Adsorption."
- [45] J. Fülöp, "Rövid kémiai értelmező és etimológiai szótár," 1998, Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.antikvarium.hu/konyv/fulop-jozsef-rovid-kemiai-ertelmezo-es-etimologiai-szotar-1010305>

- [46] "IPARI GÁZOK FŐBB ELŐÁLLÍTÁSI MÓDSZEREI 2.3 Levegőszétválasztás nyomáslengetéssel adszorpcióval (PSA-módszer)."
- [47] "Tüzelőanyag-cellák • HFC Hungary." <https://www.hfc-hungary.org/tuzeloanyag-cellak/> (accessed Jun. 02, 2023).
- [48] "9. fejezet - Üzemanyagcellák történeti áttekintése." https://mogi.bme.hu/TAMOP/jarmufedelzeti_elektronika/ch09.html (accessed Jun. 02, 2023).
- [49] "Mi az a tüzelőanyag-cella, hogyan működik és mire jó? - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=P90mqdC9zkk> (accessed Jun. 02, 2023).
- [50] "Fuel Cells", Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.fuelcellenergy.com/assets/DFC300-product-specifications1.pdf>
- [51] "A tüzelőanyag-cella működése, felépítése, jellemzői - PDF Free Download." <https://docplayer.hu/4048570-A-tuzeloanyag-cella-mukodese-felepitesi-jellemzoi.html> (accessed Jun. 02, 2023).
- [52] G. Hoogers, Ed., "Fuel Cell Technology Handbook," Sep. 2002, doi: 10.1201/9781420041552.
- [53] "Dr. Emőd István: Alternatív járműhajtások (Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft., 2006) - antikvarium.hu." <https://www.antikvarium.hu/konyv/dr-emod-istvan-tolgyesi-zoltan-alternativ-jarmuhajtasok-838807-0> (accessed Jun. 02, 2023).
- [54] "Élet és Tudomány, 2005. január-július (60. évfolyam, 1-26. szám) | Arcanum Digitális Tudománytár." https://adt.arcanum.com/hu/view/EletEsTudomany_2005_1/?pg=276&layout=s (accessed Jun. 02, 2023).
- [55] "Élet és Tudomány, 2005. július-december (60. évfolyam, 28-52. szám) | Arcanum Digitális Tudománytár." https://adt.arcanum.com/hu/view/EletEsTudomany_2005_2/?pg=0&layout=s (accessed May 18, 2023).
- [56] "Types of Fuel Cells | Department of Chemical Engineering and Biotechnology." <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/fuelcells/types-of-fuel-cells> (accessed Jun. 02, 2023).
- [57] S. Kazula, S. De Graaf, and L. Enghardt, "Review of fuel cell technologies and evaluation of their potential and challenges for electrified propulsion systems in commercial aviation," 2023, doi: 10.33737/jgpps/158036.

- [58] S. Kazula, S. De Graaf, and L. Enghardt, “Review of fuel cell technologies and evaluation of their potential and challenges for electrified propulsion systems in commercial aviation,” 2023, doi: 10.33737/jgpps/158036.
- [59] “Hidrogén előállítás”, Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: www.hfc-hungary.org/hylaw.html
- [60] “How much hydrogen do I need? | Marine Service Noord.” <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/hydrogen/how-much-hydrogen-do-i-need/> (accessed May 14, 2023).
- [61] “Árazatlan_ajánlat”.
- [62] “idealhy.eu - Liquid Hydrogen Outline.” https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline (accessed Jun. 02, 2023).
- [63] “Water Emissions from Fuel Cell Vehicles | Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/water-emissions-fuel-cell-vehicles> (accessed Jun. 02, 2023).
- [64] J. E. Tibaquirá, K. D. Hristovski, P. Westerhoff, and J. D. Posner, “Recovery and quality of water produced by commercial fuel cells,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 6, pp. 4022–4028, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.12.072.
- [65] “Előállítás, elektrolízis • HFC Hungary.” <https://www.hfc-hungary.org/elektrolizis/> (accessed Jun. 02, 2023).
- [66] “Szilárd oxidos elektrolizáló (SOEL) gyártás indul • HFC Hungary.” <https://www.hfc-hungary.org/szilard-oxidos-elektrolizalo-soel-gyartas-indul/> (accessed Jun. 02, 2023).
- [67] “midra földtudomány, elektrolizáló hatásfoka”.
- [68] “Electrolysers – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/electrolysers> (accessed Jun. 02, 2023).
- [69] “Hysata’s electrolyser breaks efficiency records | Hysata.” <https://hysata.com/news/hysatas-electrolyser-breaks-efficiency-records-enabling-world-beating-green-hydrogen-cost/> (accessed Jun. 02, 2023).
- [70] B. Shabani, R. Omrani, S. S. Mohammadi, B. Paul, and J. Andrews, “Unitised Regenerative Fuel Cells,” no. 9, pp. 306–349, 2019, doi: 10.1039/9781788016049-00306.

- [71] “Megújuló energiaforrások: fajtái, előnyei és hátrányai.”
<https://hugas.met.com/hu/fyouture/energia/megujulo-energiaforrasok/1155>
(accessed Jun. 02, 2023).
- [72] “Napelem működése: Hogyan működik a napelem, milyen típusok léteznek? - etienne.hu.” <https://etienne.hu/napelem-mukodese-hogyan-mukodik-a-napelem/>
(accessed Jun. 02, 2023).
- [73] “Energia és teljesítmény, avagy a kihasználási tényező jelentősége - SUNformation.”
https://sunformation.blog.hu/2020/01/17/energia_es_teljesitmeny_kihasznalasi_tenyezo
(accessed Jun. 02, 2023).
- [74] B. Eszter and H. Gabriella Réka, “KÖZÉPÜLETEK ENERGIARÁSEGÍTÉSE NAPELEMMEL ÉPÜLETÁLLOMÁNYUNK ENERGIATERMELÉSRE HASZNOSÍTHATÓ FELÜLETEI, PÁLYÁZATOK”, Accessed: Jun. 02, 2023.
[Online]. Available: www.negajoule.hu
- [75] “A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems,” *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, 2018, doi: 10.1016/C2016-0-01527-9.
- [76] “Mit jelent a fenntarthatóság?” <https://www.montiviz.hu/hu/hirek/mit-jelent-a-fenntarthatosag> (accessed Jun. 02, 2023).
- [77] “Power-to-Gas Hungary | LinkedIn.” <https://www.linkedin.com/company/power-to-gas-hungary> (accessed Jun. 02, 2023).
- [78] “Elindult az Akvamarin projekt | mérnökvagyok.hu.”
<https://mernokvagyok.hu/blog/2021/03/24/elindult-az-akvamarin-projekt/>
(accessed Jun. 02, 2023).
- [79] “A zöld hidrogén a mindent elsőpró megoldás? | G7 - Gazdasági sztorik érthetően.”
<https://g7.hu/tech/20201030/a-zold-hidrogen-a-mindent-elsopro-megoldas/>
(accessed Jun. 02, 2023).
- [80] “Kezdőlap - Bükkábrányi Energiapark - Megújuló energia.”
<https://bukkabranyienergiapark.hu/> (accessed Jun. 02, 2023).
- [81] “Sikertörténet projektjeink a fenntarthatóság területén | Denkstatt.”
<https://denkstatt.eu/sikertorteneteink/?lang=hu#tab-2a7a82b2b3a54f6c3e2>
(accessed Jun. 02, 2023).
- [82] “Hydrogen.” <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
(accessed Apr. 25, 2023).



EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott; Neptun-kód:.....

a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős,

..... szakos

hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy

.....
című szakdolgozatom/diplomatervem saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozat esetén plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén szakdolgozatom visszautasításra kerül.

Miskolc,évhónap

.....

Hallgató