

Zöld hidrogénelőállító-technológiák piaci-technológiai elemzése

Budapest, 2023. szeptember 30.

Tanulmány célja



Elérhető zöld hidrogén előállítási technológiák felmérése a nemzetközi szakirodalom alapján

Elemzési szempontok:

- Technológiai érettség
- Piaci fejlettség – ellátási lánc
- Gazdaságossági mutatók
- Kockázatok és kritikus tényezők

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
– Zöldhidrogén fogalma és előnyei (fenntarthatósági hatása)	4
– Elektrolízis folyamata és működése (műszaki alapjai)	7
– Elektrolizáló technológiák összehasonlítása	35
– Piaci szereplők az elektrolizáló technológiákban	38
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

Zöldhidrogén körkép- előállítási lehetőségek

A karbonlábnyom csökkentése érdekében számos technológiai lehetőség született a hidrogén előállítására, ami kiválthatja a fosszilis tüzelőanyagok egy részét.

Technológiai lehetőségek	TRL	Előnyök	Korlátok
1. Biológiai hidrogén előállítás: Bizonyos mikrobák és algák képesek hidrogént előállítani a fotoszintézis során. Ezen organizmusok tenyésztése hidrogént állít elő. Ezeket a mikrobákat genetikailag módosíthatják vagy optimalizálhatják a hatékonyság növelése érdekében.	5-6	Olcsó, egyszerű katalizátor	Alacsony hatékonyság, nagy mennyiségű vízhasználat
2. Termokémiai módszerek: A termokémiai zöldhidrogén előállításának többféle módszere létezik, amelyek különböző kémiai reakciókat használnak fel a víz bontásához. A legismertebb módszerek a következők: cink-ciklus, szulfát-ciklus, réz-klorid-ciklus	3-4	Nem igényel elektromos áramot, magas konverzió	Magas hőmérséklet, drága anyagok, kémiai folyamat bonyolult
3. Biomassza konverzió: Biomassza, például fa vagy növényi hulladék, gázosítása vagy reformálása során előállítható hidrogén. Az ilyen források esetében fontos, hogy a biomassza termesztése és használata fenntartható legyen.	5-6	Ipari és mezőgazdasági hulladék hasznosítás	Magas CAPEX, kevés megfelelő lokáció, könnyű vízszennyezés
4. Geotermikus hidrogén előállítás: Geotermikus energiát használhatnak fel a hidrogén előállításához, elektrolízis segítségével, olyan területeken, ahol a geotermikus energia könnyen hozzáférhető.	5-6	Hatékony hő felhasználás	Fajlagosan drága hidrogén
5. Víz elektrolízis: A vízmolekulákat elektromos áram hatására bontják hidrogén és oxigén gázokra. Ha az elektromos energia megújuló forrásokból, például napelemekből vagy szélerőművekből származik, akkor a hidrogén előállítása CO ₂ kibocsátásmentes lehet.	7-9	Kifejlett technológia ipari méretben	SMR-hez képes magas hidrogén költség

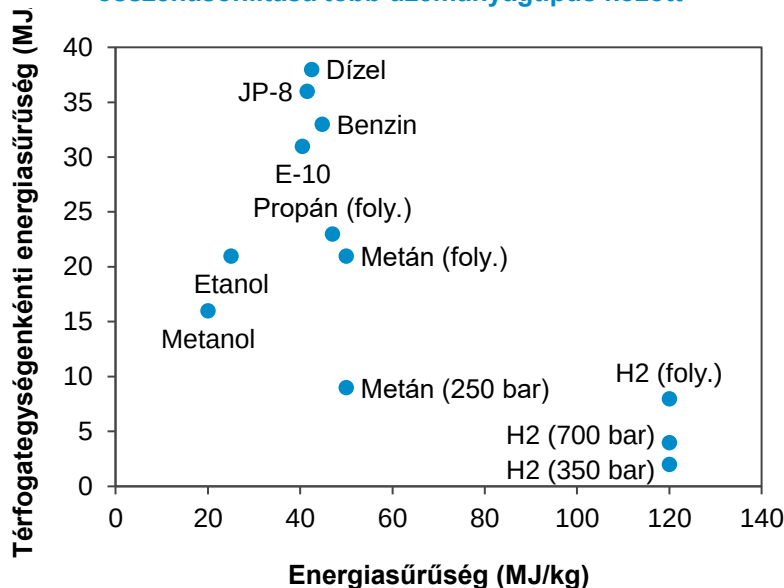
Hidrogén tulajdonságai

A hidrogén standard körülmények között egy színtelen szagtalan gázhalmazállapotú anyag. Gyúlékony és redukáló hatású gáz, amely kisebb sűrűségű a levegőnél és vízben kis mértékben oldódik

- A hidrogén **tömegegységenként több energiát tartalmaz**, mint a földgáz vagy a benzin, így az közlekedési üzemanyagként vonzó.
- A hidrogén a legkönnyebb elem, így **alacsony a térfogategységenkénti energiasűrűsége**. **Nagyobb térfogatú hidrogénnek kell lennie** más tüzelőanyagokkal összehasonlítva azonos energiaigények kielégítése érdekében.
- Ezt el lehet érni, **például nagyobb vagy gyorsabb áramlású csővezetékek és nagyobb tárolótartályok** használatával. A **hidrogén sűríthető, cseppfolyósítható vagy hidrogén alapú üzemanyagokká alakítható**, amelyekkel a nagyobb energiasűrűség, de ez (és minden későbbi újraátalakítás) némi energiát használ fel.



Az energiasűrűség és térfogategységenkénti energiasűrűség összehasonlítása több üzemanyagtípus között



Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
– Zöldhidrogén fogalma és előnyei (fenntarthatósági hatása)	4
– Elektrolízis folyamata és működése (műszaki alapjai)	7
– Elektrolizáló technológiák összehasonlítása	35
– Piaci szereplők az elektrolizáló technológiákban	38
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

Elektrokémia és az elektrolízissel előállított hidrogén

Hidrogén előállítás



- A hidrogén **ígéretes energiahordozó** a fenntartható jövőben, különösen akkor, ha megújuló energiát használunk a termeléséhez. Jelenleg a **hidrogén túlnyomó része klórgyártás melléktermékeként keletkezik**, de a cél, hogy növelve legyen az elektrolízissel előállított megújuló hidrogén aránya a fosszilis energiahordozók helyettesítése érdekében.
- A víz elektrolízise kulcsfontosságú a tiszta hidrogén előállításához megújuló energiával. Nap- és szélenergia az optimális források, bár ezek eloszlása változó. **Magasabb megújuló energiaárány és CO₂-kibocsátási költségek esetén az elektrolitikus hidrogén előállítás vonzóbb lehet.**
- A víz **elektrolízis és megújuló energia együttes használata előnyös, mivel a felesleges elektromos energiát hidrogénként tárolhatjuk**. Nagy mennyiségű hidrogént lehet tárolni különböző módszerekkel, ami hozzájárul a megújuló energiatermelés és tiszta üzemanyagok elterjedéséhez.
- Bár az elektrolízis **jelenleg csak a globális hidrogéntermelés kis részét teszi ki**, nagy lehetőségek rejlenek benne alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén előállítása miatt.
- A változó megújuló energiaforrásokból származó **többletenergiát érdemes a hidrogéntermelésre fordítani, különösen olyan régiókban, ahol rendelkezésre állnak megújuló energiaforrások**. Azonban fontos figyelembe venni, hogy a hidrogén előállítása nagy mennyiségű energiát és vizet igényel, és ezt fenntartható módon kell megoldani a jövőben.

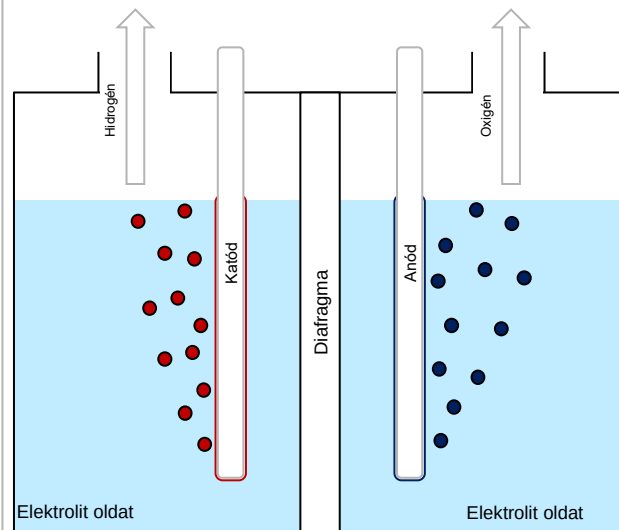


Elektrokémia és az elektrolízissel előállított hidrogén

Az **elektrolízis** egy elektromos áram hatására zajló elektrokémiai folyamat, amely során redoxireakciók mennek végbe, vagyis elektromos energia alakul át kémiai energiává. Az elektrolízis során lejárló reakciók energiaigényes folyamatok és magas aktiválási energiával rendelkeznek. Ezek a folyamatok önmaguktól nem végbemenő reakciók.

Elektrolizáló cella felépítése

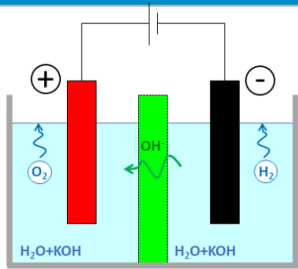
- **Elektrolit:** Az elektrolizáló cella közegét elektrolit tölti ki, ami olyan anyag, amely elektromosan vezető és lehetővé teszi az ionok mozgását. Az elektrolit lehet folyékony vagy akár kismértékben vezető szilárd anyag is.
- **Elektródok:** Az elektródok olyan vezető anyagok, amelyeknek szerepe van az elektromos áram be- és kilépésében az elektrolitból. Két fajta elektród van:
 - Anód: Az anód a pozitív töltésű elektród. Az elektrolízis során az anódon oxidációs megy végbe.
 - Katód: A katód a negatív töltésű elektród. Az elektrolízis során a katódon redukció megy végbe.
- **Áramforrás:** Az elektrolizáló cellát egy külső áramforrás, például akkumulátor vagy tápegység, látja el elektromos árammal.
- **Elektrolízis tartály vagy cella kamra:** Itt helyezkednek el az elektródok és az elektrolit. A kamra lehet olyan kialakítású, hogy az elektródok és az elektrolit szigorúan elkülönüljenek, vagy akár egy közös térben is indíthatják a reakciókat.



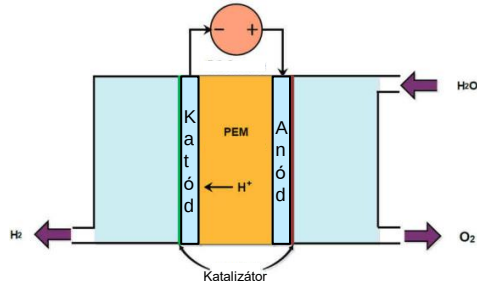
Elektrolizáló technológiák - Magas TRL technológiák

Hidrogéntermelő elektrolizáló technológiák

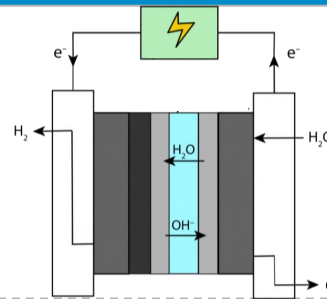
Alkáli/Lúgos elektrolízis



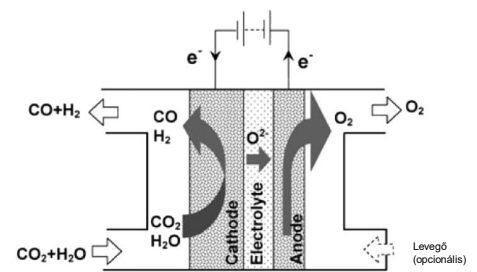
PEM elektrolízis



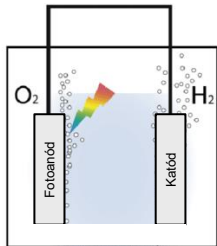
AEM elektrolízis



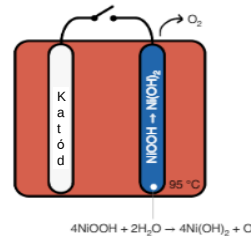
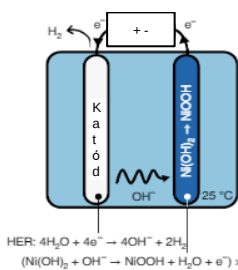
SOEC elektrolízis



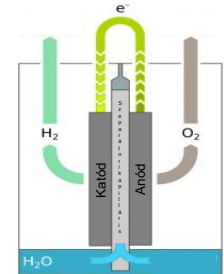
Fotoelektrokémiai vízbontás



E-TAC



CFE

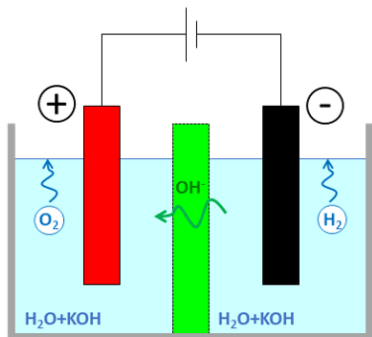


Lúgos/alkáli elektrolízis (AWE)

Elektrolizáló technológia

Alkáli víz elektrolízis

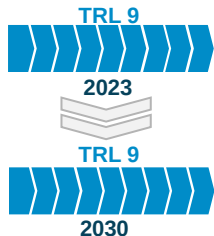
» Lúgos KOH/NaOH oldat elektrolízise



Műszaki folyamat leírása

- Az elektrolizáló két elektródából áll, amelyeket folyékony elektrolit vizes oldatba merítenek, általában 20–40%-os nátrium-hidroxidot (NaOH) vagy kálium-hidroxidot (KOH). Az elektrolízis katód és anód folyamata térben szétválasztott, így a H_2 és az O_2 is elkülönített, ami biztonsági és tisztasági szempontokból előnyös.
- Az előállított hidrogén tisztasága 99,5-99,9%, és katalitikus gáztisztítási eljárásokkal 99,999%-ra növelhető.
- Az AWE teljesítményét különösen a membrán/diafragma, az anód és a katód anyagának típusa és vastagsága befolyásolja.
- Kiforrott technológia. Az 1920-as évek óta használják, különösen a műtrágya- és klóripár hidrogéntermeléséhez. Számos nagyteljesítményű lúgos elektrolizálót építettek a múlt században a nagy vízenergia-forrásokkal rendelkező országokban (Kanada, Egyiptom, India, Norvégia és Zimbabwe), ezek szinte mindegyiket leállították és SMR technológiára cserélték.
- Az alkáli elektrolízis miatt viszonylag alacsony CAPEX jellemzi a többi elektrolizáló technológiához képest, a ritka és drága anyag mentessége miatt.

Technológiai érettség



- » Elterjedt, érett technológia
- » Kereskedelmi forgalomban

Technológiai fejlesztések területe

- » Katalizátorok elektródok anyagának fejlesztése

Előnyök

- Kiforrott és elterjedt technológia
- Nagy kapacitású berendezések
- Olcsó katalizátor és elektródok

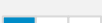
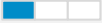
Korlátok

- Folyamatos Áram ellátást igényel, ami problémássá teszi az időjárásfüggő megújulókhöz való közvetlen csatlakoztatást
- Magasabb üzemi hőmérséklet (80-100°C)
- Nagy koncentrációjú bázikus közeg – nehezebb vízkezelés
- Nagy méret és súly

Számos tevékenység létezik az alkáli elektrolízis teljesítményének javítására, azonban a jelentős hasznot hordozó beavatkozások megvalósítása nagy kihívást jelent

- Az alkáli elektrolízis (AWE) a **legérettebb technológia** a zöld hidrogén előállítására a karbonsemlegesség elérése érdekében. A zöld hidrogén magas ára azonban **alacsony piaci kihasználtságához vezet**. Az arány javításának kulcsa az **alacsony költségű és hatékony elektrokatalizátorok kifejlesztése**, amelyek könnyen és nagy mennyiségben gyárthatók az iparban.
- Az elektrolizáló **teljesítményét befolyásolja a membrán / anód / katód anyagtípusa** és vastagsága, ezért a fejlesztések főként ezeken a területekre fókuszáltak

Javasolt tevékenységek az alkáli elektrolízis teljesítményének javítására

	Nehézség	Haszon
A katalizátor felületének növelése > 50 m2/g		
A katalizátor kihasználtságának növelése > 80%		
Javítani a hidrogén és oxigén fejlesztési reakciójának a kinetikáját új nikkkel alapú ötvözetekkel		
Megakadályozni a katalizátor mérgezését/leállását elektrolitból származó idegen elemekkel, valamint a rendszerben jelen lévő komponensekkel		
Kialakítani, létrehozni és integrálni a gázáteresztő (crossover) reakciós katalizátorokat		
Megakadályozni a katalizátorok kritikus lebomlását az anód oldalon, hogy elkerüljük a felület elvesztését		
Megakadályozni a nikkeldioxid (NiH) kialakulását a katód oldalon		
Megszüntetni a katalizátorrétegek mechanikai lebomlását (különválás, feloldódás)		
Azonosítani olyan stabil polimerkémiát, amelyet ionomerként (OH-szállítás) lehet használni elektrolizálókat elektrodjainak készítéséhez		
Azonosítani és csökkenteni az interfész ellenállásokat a katalizátorrétegtől a pórusos szállítórétegekig		

 Könnyű  Közepes  Nehéz

Proton cserélő membrán elektrolizáló (PEM)

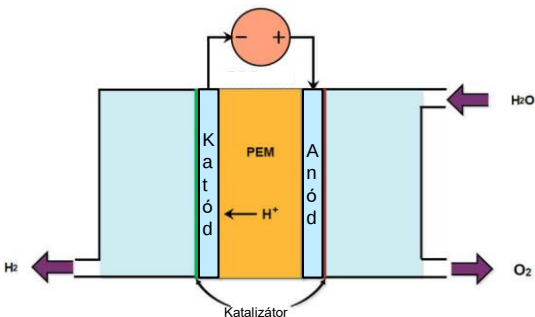
Elektrolizáló
technológia

PEM víz elektrolízis

» Szilárd polimer membrán elektrolit

Műszaki folyamat leírása

- A PEM elektrolízis több mint hatvan éve ismert, a General Electric fejlesztette ki. A PEM technológia, a lúgos elektrolízisre jellemző folyékony elektrolitot, szilárd polimer elektrolitra cseréli, amely szelektíven vezeti a pozitív ionokat, például a protonokat. Ez a technológia javítja az áramsűrűséget és az energiahatékonyságot. A vízbontási reakcióban résztvevő protonok lokálisan savas környezetet hozva létre. Az elektródokon lejátszódó reakciók:
- Anód (+) reakció: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \frac{1}{2}\text{O}_2$
- Katód (-) reakció: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- A bruttó reakció: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$
- A PEM elektrolízisnek számos előnye van, például nagy áramsűrűség, nagyobb energiahatékonyság, alacsony gázpermeabilitás, szélesebb üzemi hőmérséklet ($20\text{--}80^\circ\text{C}$), könnyű kezelhetőség és karbantartás. Azonban a PEM elektrolízis katalizátorai a nemesfémek (Pt, Ir, Ru). Ezeknek a ritka nemesfémeknek a magas beszerzési ára miatt a PEM elektrolízis magasabb befektetés költséget igényel, mint a lúgos elektrolízis. Emiatt a kutatók óriási erőfeszítéseket tesznek a PEM elektrokatalizátorok költségeinek csökkentése és belső aktivitásának javítása érdekében.



Technológiai érettség

TRL 7.8



» Kereskedelmi forgalomban kapható, második leggyakrabban alkalmazott

2023



TRL 9

2030

» Katalizátorok, elektródok anyagának fejlesztése

Technológiai
fejlesztések területe

Előnyök

- Feltörekvő technológia
- Kompakt (konténer) megoldások
- Szeperált nagy tisztaságú gázfejlesztés
- Rugalmas terhelhetőség
- Egyszerűbb víz kezelés

Korlátok

- Drága katalizátor – a keletkező savas közeg miatt, korrózióálló nemesfémek alkalmazása szükséges

PEM elektrolizáló legnagyobb hátránya a ritka fémek korlátozott elérése, ami még tovább növelheti a technológiára jellemző magasabb beruházási költségeket

- PEM elektrolizáló számos előnnyel rendelkezik, mint például **rugalmas működés, magasabb kimeneti nyomás és kisebb méret**, azonban **magasabb beruházási költségekkel és rövidebb élettartammal** jár.
- A PEM elektrolizáló egyik fő kihívása az, hogy az alkalmazott ritka **drága fémek, például arany, platina és irídium, növelik a cella gyártási költségeit**.
- Ezek a ritka fémek bár **kevesebb mint 10% -át teszik ki** a rendszerek összköltségének, **korlátozott elérhetőségük** miatt akadályozhatják a széleskörű bevezetésüket.
- A **pozitív póluson az irídiumot használják**, hogy növeljék a cella élettartamát, különösen akkor, amikor a rendszer extrém körülmények között működik.
- A **negatív póluson gyakran platinát alkalmaznak**, de más anyagok, például a tantál is kezd megjelenni alternatívaként erre a célra.

Javasolt tevékenységek a PEM elektrolízis teljesítményének javítására

	Nehézség	Haszon
Az alkatrészekből és a rendszerből származó idegen elemek általi membránmérgezés/deaktiválás mérséklése		
Rekombinációs katalizátorok tervezése, létrehozása és integrálása a gázpermeációhoz		
Az anód- és katód katalizátorkihasználtságának növelése		
A katalizátorréteg és a porózus transzportrétegek közötti határfelületi ellenállások meghatározása és csökkentése		
A perfluorozott szulfonsav (PFSA) membránok ohmos veszteségeinek és gázpermeációjának csökkentése		
Az oxigénfejlődés kinetikájának javítása irídiummentes katalizátorok használatával, az irídiumhoz hasonló tulajdonságok fenntartása mellett		
A katalizátorrétegek mechanikai degradációjának kiküszöbölése (delamináció, oldódás)		
Megszüntetni a katalizátorrétegek mechanikai lebomlását (különválás, feloldódás)		
Titánmentes porózus transzportrétegek létrehozása		

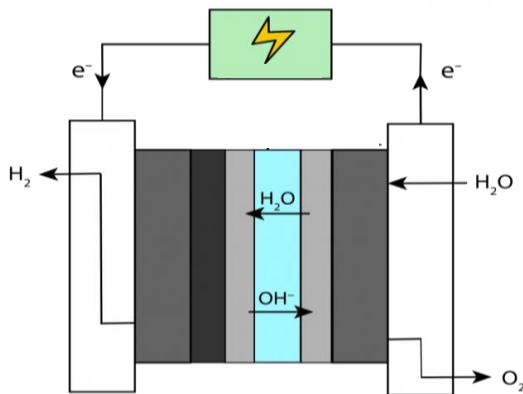
 Könnyű  Közepes  Nehéz

Anion cserélő membrán elektrolizáló (AEM)

Elektrolizáló
technológia

AEM víz elektrolízis

» PEM előnyeinek savas közeg nélkül



Műszaki folyamat leírása

- Az elmúlt években a polimer anion cserélő membránok fejlesztése alkalmassá tette azokat, az elektrokémiai rendszerekben való felhasználásra. Az AEM magában foglalja az Alkáli elektrolízis (alacsony költségű anyagok) és a PEM (mérsékelt hőmérséklet, membránválasztás és tiszta víz) előnyeit. A lúgos környezet fenntartása mellett az elektrokatalizátor költségének csökkentése érdekében, mint az AWE-ben, a töltést, a hidroxidionok szállítják egy polimer anioncserélő membránon (AEM) keresztül.
- Az alkáli és az AEM elektrolízis közötti fő különbség az, hogy az alkáli víz elektrolízis hagyományos diafragma helyett egy AEM-mel történik

Technológiai érettség



2023



2030

- » Ötvözi a PEM és az alkáli elektrolízis előnyeiket. Bejelentett pilot projektek vannak

Technológiai
fejlesztések területe

- » Katalizátorok, elektródok, membránok anyagának fejlesztése

Előnyök

- PEM előnyeinek, de a rendszernek nem korrozív savas közeg kell elviselnie – egyszerűbb anyagok felhasználása is elegendő

Korlátok

- Membrán technológia nem kiforrott – fejlesztés szükséges

Az AEM rendszerek kutatása főképp laboratóriumi méretre korlátozódik, a fejlesztések megvalósítása többnyire nehéz és körülményes

- Az AEM rendszerekkel kapcsolatos kutatások elsősorban **laboratóriumi méretre korlátozódtak**, főként a katalizátorok, membránok és üzemeltetési mechanizmusok fejlesztésére összpontosítva.
- A cél az, hogy **magas hatékonyságú, alacsony költségű és stabil AEM eszközöket hozzanak létre**, és ehhez fontos szerepet játszanak az anyagok és feltételek, mint például a katalizátorok, membránok, ionomerek és elektrolyt típusa, valamint az üzemeltetési hőmérséklet.
- A **legfontosabb teljesítmény mutató az összesített legjobb feszültség-áram teljesítmény**, amely az AEM rendszerek teljesítményének értékelésére szolgál.

Javasolt tevékenységek a AEM elektrolízis teljesítményének javítására

	Nehézség	Haszon
Költséghatékony porózus szállítási rétegeket fejlesztése az AEM elektrolizálóhoz		
A katalizátorréteg és a porózus transzportrétegek közötti határfelületi ellenállások meghatározása és csökkentése		
Az elektrokatalizálók oxidált állapotának szabályozása az oxigénoldalon (anódon)		
Az AEM membránok ohmos veszteségeinek és gázpermeációjának csökkentése		
A hidrogén- és oxigénfejlődés kinetikájának javítása és hosszú távú stabilitás fenntartása		
Az AEM-membrán tartósságának növelése		
A katalizátorrétegek mechanikai degradációjának kiküszöbölése (leválás, feloldódás) és az ionomer/katalizátor kötési tulajdonságainak javítása.		

Könnyű Közepes Nehéz

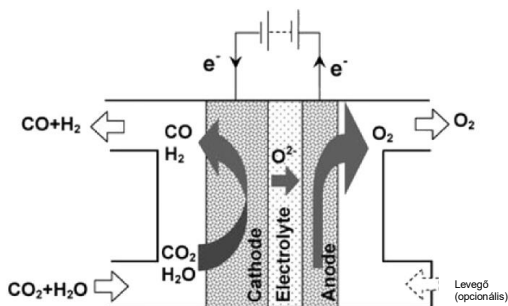
Szolid oxid elektrolizáló cella

Elektrolizáló
technológia

SOEC víz elektrolízis

» Magas hőmérsékletű, akár reverzibilis működés

Műszaki folyamat leírása



A SOC olyan magas hőmérsékletű (700-900°C) szilárd eszközök, amelyek kettős reverzibilis funkcióval rendelkeznek:

- Szilárd oxid üzemanyagcellák (SOFC) az üzemanyagok, például a H_2 , a földgáz és más szénhidrogének kémiai energiájának elektromos energiává alakítására.
- A szilárd oxid-elektrolízis cellák (SOEC) pedig az elektromos energia tárolására képesek hidrogén formájában.

Az SOEC-kat oxigénion vezető vagy protonvezető elektrolitok alapján kategorizáljuk, O-SOC-ként vagy H-SOC-ként.

- H-SOC, amelyek jelentős proton vezetőképességet mutatnak közepes hőmérsékleteken (pl. 500–700 °C), és így ígéretes elektrolitok a széles körű elektrokémiai alkalmazásokban.
- O-SOC, amely esetében a O_2 -ionok a töltéshordozók és az oxigén-ionok diffundálnak az elektroliten keresztül, hogy elérjék az oxigén/levegő-elektrodot.

Technológiai érettség



2023

» SOFC magas TRL, SOEC TRL = 6, reverzibilis SOC cella alacsony TRL

Technológiai
fejlesztések területe



2030

» Katalizátorok, elektródok, membránok anyagának fejlesztése

Előnyök

- Magas hőmérséklet miatt magas hatásfokú elektrolízis lehetséges, fajlagosan olcsóbb hidrogén termelés
- Alacsonyabb üzemi feszültség alkalmazható,
- Reverzibilis működés miatt nagy flexibilitás, és alkalmazható a villamos hálózat stabilitásának fenntartásában és energiatárolásban

Korlátok

- Magas hőmérséklet és nyomás miatt bonyolultabb technológia a PEM, AEM és AWE-hez képest
- Alacsonyabb élettartam, mint az AEL, PEM
- Elektrolitok érzékenysége a szennyeződésre
- Nagy CAPEX
- Üzem biztonság: magas hőmérséklet miatt fokozott kockázat

A SOEC elektrolizálók teljesítménye az elmúlt 15 évben a 2,5-szeresére nőtt, és a jövőben elérheti akár a megawattos teljesítményt is

- A fenntartható **elektrolízis technológiáknak olyan könnyen beszerezhető anyagokra kell épülniük** a jövőben, amelyek közül a YSZ (yttrium-stabilizált cirkónia) és a fém Ni és YSZ ötvözet jelentős előnyt nyújt más ritka fémekhez képest.
- Az elmúlt 15 évben a szilárd oxid elektrokémiai cellák **(SOEC) teljesítménye több mint 2,5-szeresére nőtt**, és ezt három fő módosítással érték el:
 - javított cell rétegek feldolgozása,
 - oxigén-elektroda Sr-adalékolt LaMnO3-ről kevert vezetőképes oxidokra való áttérés,
 - az elektrokémiai aktív fázisok felszínének növelése
- Ezek a fejlesztések **lehetővé tehetik nagyobb teljesítményű és akár megawatt méretű elektrolízis rendszerek létrehozását** a jövőben, ezért a technológia folyamatos kutatása és fejlesztése kulcsfontosságú a fenntartható hidrogén- és oxigéntermelés előmozdításához.

Javasolt tevékenységek a SOEC elektrolízis teljesítményének javítására

	Nehézség	Haszon
Az elektródák kémiai szerkezetének és kompatibilitásának stabilizálása	●	
Az elektrokatalizátorok oxidációs állapotának szabályozása az oxigénoldalon (anódon) vagy a nikkell agglomerációban	●	
Az elektródák elektrokatalitikus aktivitásának növelése alacsonyabb hőmérsékleten	●	
A lantán-manganit (LSM) vagy lantán-ferrit (LSF) elektrolitról való leválásával kapcsolatos kihívások megoldása	●	
A hidrogén- és oxigénfejlődés kinetikájának javítása és a hosszú távú stabilitás fenntartása	●	
A szilícium-dioxid (SiO ₂) kioldódásával kapcsolatos szennyeződési problémák kiküszöbölése vagy csökkentése a kötegek tömítőanyagaiból	●	
Az elektrolitok és az elektródák közötti tágalási együttható eltérésből adódó termikus instabilitási problémák kiküszöbölése	●	
A stackkomponensek méretnövelése nagyobb, MW méretű stackegységek felé	●	

● Könnyű ● Közepes ● Nehéz

Hidrogén termelő elektrolizáló egységek felépítése

- Az elektrolizáló **elektromos rendszerből**, **elektrolizáló egységből**, **gáz-szeperáló rendszerből**, **tisztító/szárító rendszerből**, **hűtő rendszerből**, **hidrogén kompresszorból**, **hidrogén tároló egységekből** és **egyéb segédrendszerből** áll. Az elektromos rendszer az elektrolizáló és más áramot felhasználó eszközök stabil áramellátását szolgálja, ideértve a transzformátort, egyenirányítót stb. Az elektrolizáló a létfontosságú berendezés, egyben a legnagyobb energiafelhasználó komponens.
- **Hidrogén kompresszor:** Hidrogén rendkívül alacsony tömegű anyag (1 kg hidrogén 15°C-on és 100 kPa nyomáson 12,3 m³ térfogatot foglal el), ennek összenyomásához speciális kompresszorok szükségesek. A leggyakrabban használt típusok a reciprocating (dugattyús), diafragma (membrános) és centrifugális kompresszorok.
- **Víz előkészítése:** Mindegyik technológiába a víz elsőként egy tisztítási lépésen megy át (szűrés, lágyítás, deionizálás, ultra és mikrofiltráció). AWE és AEM esetén a KOH/NaOH oldat létrehozása egyedi lépés.
- **Hidrogén tárolás:** különböző anyagok állnak rendelkezésre a tárolókapacitás kielégítésére. Acél, kompozit, karbon-szálas palackok. Viszonylag új technológia a metál szivacsos tárolás, ahol a fém (pl: titán, niobinium) intersticiálisan a fémrácsban megkötö a hidrogént

IRENA (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_Hydrogen_breakthrough_2021.pdf?la=en&hash=40FA5B8AD7AB1666EECBDE30EF458C45EE5A0AA6)

Milewski, J., Szczęśniak, A., & Lewandowski, J. (<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128799>)



Hidrogén termelő elektrolizáló egységek felépítése

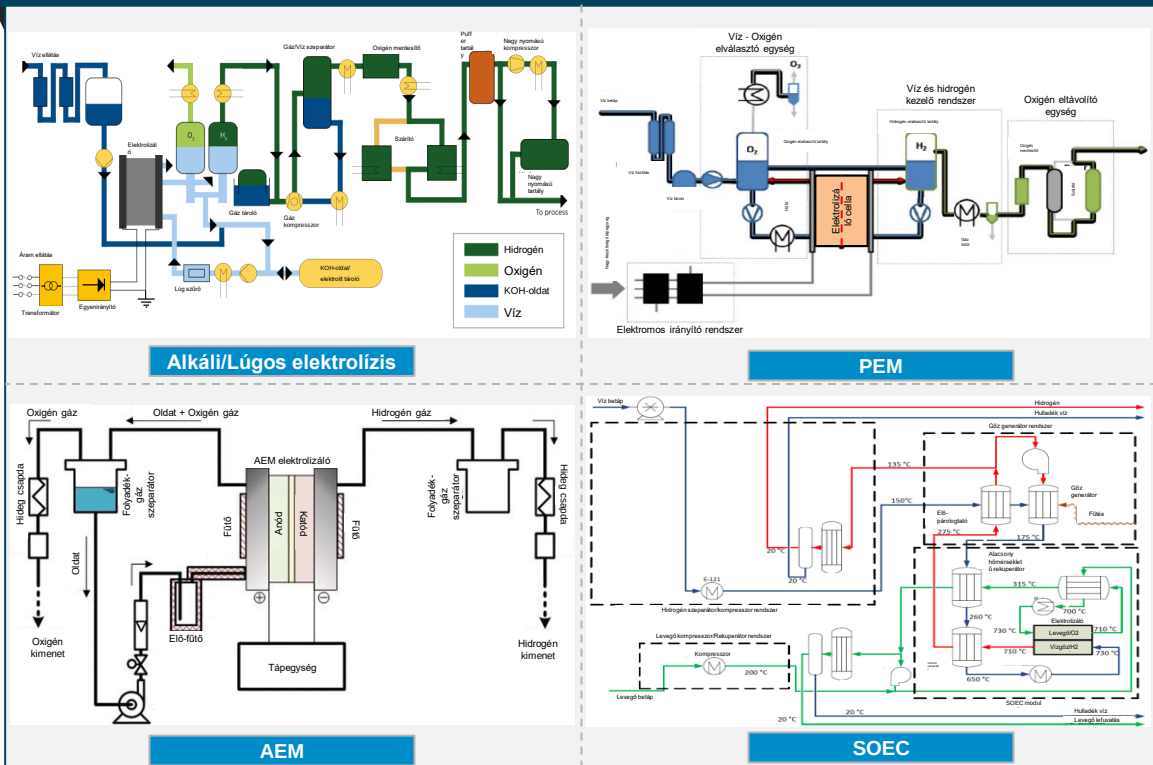
- Az elektrolizáló **elektromos rendszerből**, **elektrolizáló egységből**, **gáz-szeparáló rendszerből**, **tisztító/szárító rendszerből**, **hűtő rendszerből**, **hidrogén kompresszorból**, **hidrogén tároló egységekből** és **egyéb segédrendszerből** áll. Az elektromos rendszer az elektrolizáló és más áramot felhasználó eszközök stabil áramellátását szolgálja, ideértve a transzformátort, egyenirányítót stb. Az elektrolizáló a létfontosságú berendezés, egyben a legnagyobb energiafelhasználó komponens.

- Hidrogén kompresszor:** Hidrogén rendkívül alacsony tömegű anyag (1 kg hidrogén 15°C-on és 100 kPa nyomáson 12,3 m³ térfogatot foglal el), ennek összenyomásához speciális kompresszorok szükségesek. A leggyakrabban használt típusok a reciprocating (dugattyús), diafragma (membrános) és centrifugális kompresszorok.

- Víz előkészítése:** Mindegyik technológiába a víz elsőként egy tisztítási lépésen megy át (szűrés, lágyítás, deionizálás, ultra és mikrofiltráció). AWE és AEM esetén a KOH/NaOH oldat létrehozása egyedi lépés.

- Hidrogén tárolás:** különböző anyagok állnak rendelkezésre a tárolókapacitás kielégítésére. Acél, kompozit, karbon-szálal palackok. Viszonylag új technológia a metál szívacsos tárolás, ahol a fém (pl: titán, niobinium) intersticiálisan a fémrácsban megkötö a hidrogént

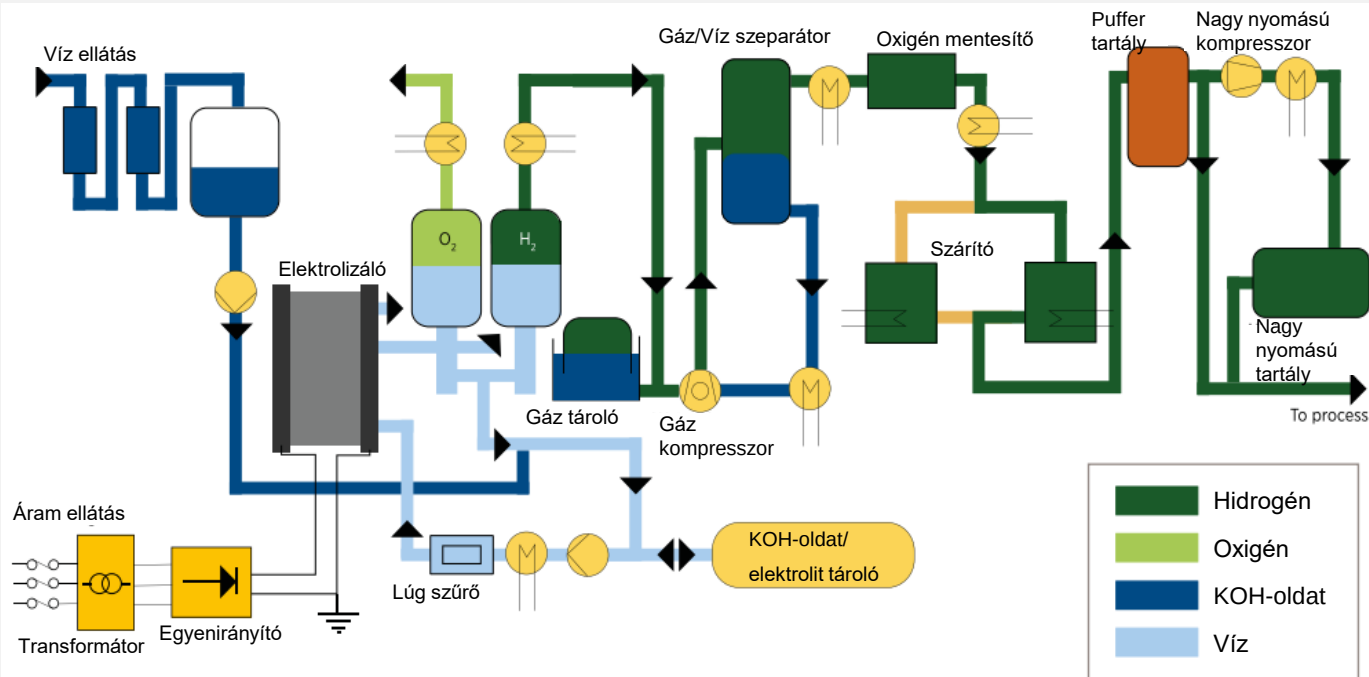
Az elektrolizáló rendszer elemeinek részletezett ábrái



Hidrogén termelő elektrolizáló egységek felépítése – Alkáli elektrolízis

- Alkáli elektrolizáló rendszerek felépítése nagymértékben eltér az elektrolit kezelésében. A lúgos **KOH-oldat tárolása előkészítése**, külön rendszert igényel, ami alkalmas a **magas pH oldatok** kezelésére. Az oldat utólagos kezelése is jelentős feladatokkal jár.
- További **gáz szeparációs/tisztítási** módszerek szükségesek a 99.5 V/V%-nál nagyobb tisztaságú hidrogén előállításához.

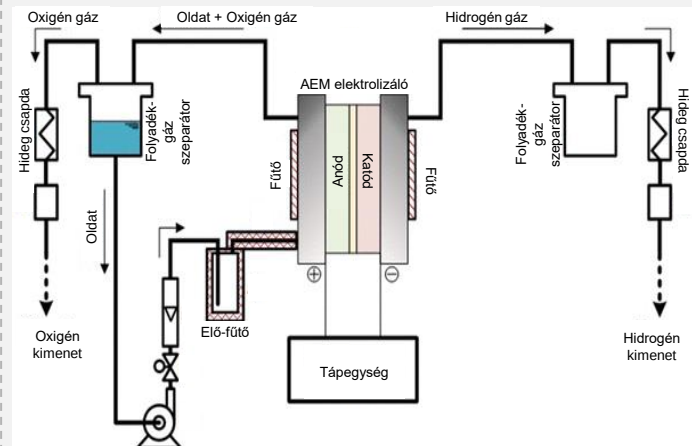
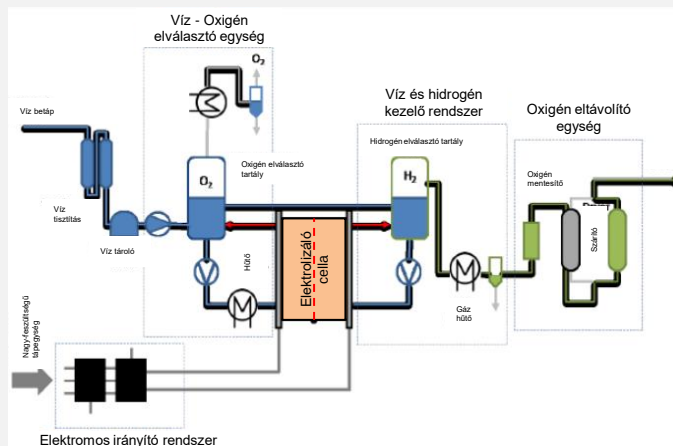
Az elektrolizáló rendszer elemeinek részletezett ábrái



Hidrogén termelő elektrolizáló egységek felépítése – PEM, AEM elektrolízis

- A PEM és AEM rendszerek **felépítése hasonló**.
- A rendszerek anód oldalán az **oxigén az elektrolit oldattal távozik**, aminek a szétválasztása fontos feladat az oxigén gyúlékony tulajdonsága miatt.
- A hidrogén oldalán kismennyiségben tartalmazhat oxigént, ami robbanásveszélyes elegyet alkot ezért fokozott figyelmet igényel annak eltávolítása

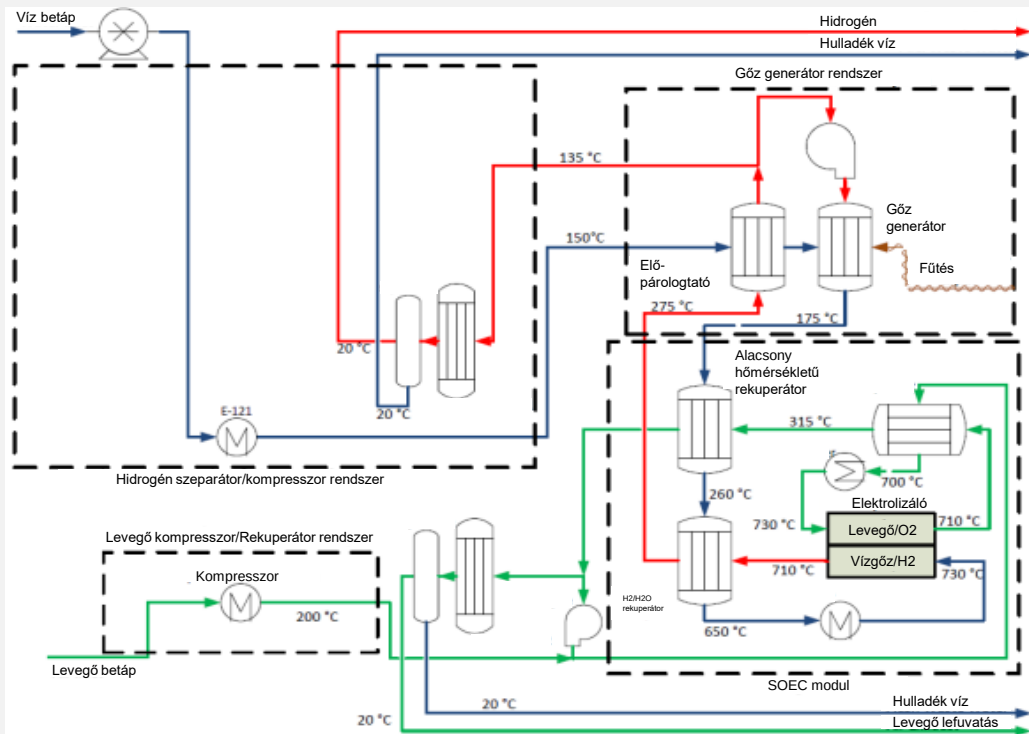
Az elektrolizáló rendszer elemeinek részletezett ábrái



Hidrogén termelő elektrolizáló egységek felépítése – SOEC elektrolízis

- A SOEC elektrolizáló rendszerek, technikai megvalósítása jelentősen eltér a korábbi elektrolizálóktól köszönhetően a magas üzemeltetési hőmérsékletnek.
- A víz elektrolizáló cellába juttatása gőzként történik amihez szükséges gőz generátor rendszer.
- A levegő bejuttatásához kompresszor rendszer és fűtő rendszer szükséges.

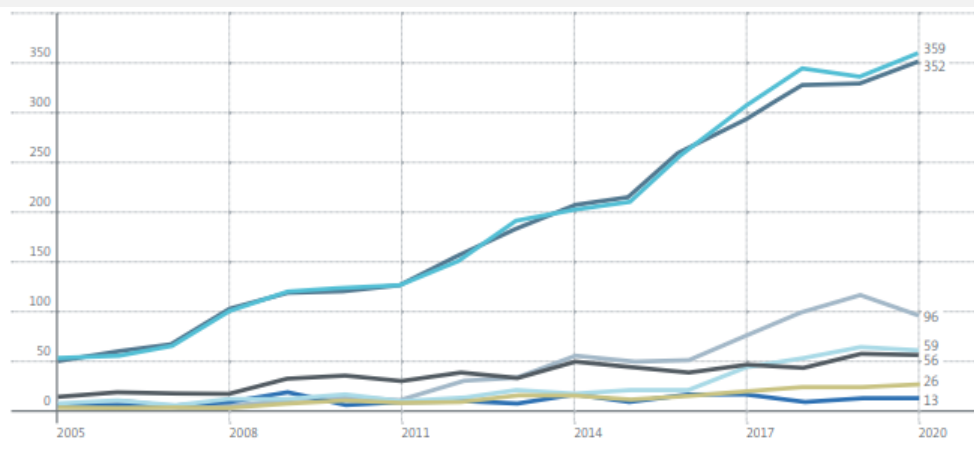
Az elektrolizáló rendszer elemeinek részletezett ábrái



Fejlesztési területek, szabadalmak: Cella működés, feltételek és szerkezet

- A **szabadalmaztatási irányzatok** a cella működésével és szerkezetével kapcsolatban a következő **kutatási területekre szorítkoznak**:
 - Szobahőmérsékletű elektrolízis
 - Légköri nyomású elektrolízis
 - Magas nyomású
 - Magas hőmérsékletű
- Cella szerkezet**:
 - Szétválasztott elektródák (devided)
 - Nem szétválasztott elektródák (non-devided)
 - Nem szétválasztott rés nélküli elektródák (devided zero gap)
- Általánosságban igaz, hogy a **magas nyomású és hőmérsékletű elektrolízis hatékonyabb**. A beadott szabadalmak száma alapján az egyszerű **működési körülmények fejlesztését helyezi előtérbe** (2015 - 2020 között a legtöbb szabadalom ezekben a témákban volt).
- Kevesebb beadott szabadalom született a magas nyomású és hőmérsékletű elektrolízis témájában de számuk így is megduplázódott, ami arra utal, hogy az ipari felhasználása a **hidrogén elektrolízissel való előállításának is az elmúlt években nagyobb hangsúlyt kapott**.

Hidrogén cellák – szabadalom csoportok

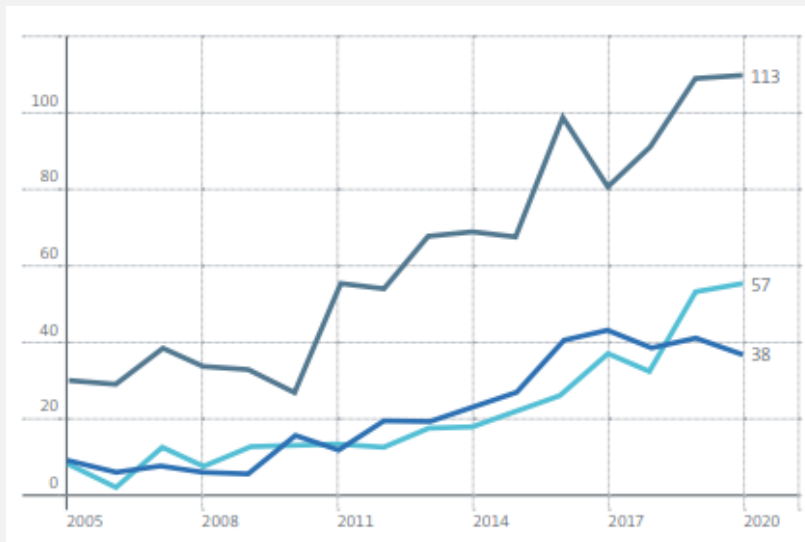


2005 és 2020 közötti nemzetközi szabadalom trendek az elektrolizáló cellák fejlesztésének témájában, felosztva a kutatási területek alapján:
Szobahőmérsékletű elektrolízis —, Légköri nyomású elektrolízis —, Szétválasztott elektródák (devided) —, Nem szétválasztott elektródák (non-devided) —, Nem szétválasztott rés nélküli elektródák (devided zero gap) —, Magas nyomású —, Magas hőmérsékletű —

Fejlesztési területek, szabadalmak: Elektrokatalizátor anyaga

- Jelenleg az egyik legfontosabb kutatási terület az elektrolizálóban kulcs szerepet játszó **ritka anyagoktól való függés megszüntetése**. Az új anyagok kiválasztásánál kompromisszumot kell kötni a hatékonyság és a katalizátor tartósság között. Az új anyagok használatára beadott szabadalmak a következő csoportokba sorolhatóak:
 - Nemesfémeket ötvözetek
 - Nem nemesfém ötvözeteket
 - Kerámiákat
 - Szerves anyagok
 - Gyémánt
 - Nem gyémánt anyagokat.
- A trendek azt mutatják, hogy **évről évre nő a nem nemesfém és nem fémes anyagokkal kapcsolatos szabadalmak száma**, de jelenleg is a fő kutatási irány a nemes fém katalizátorok.
- Az elektrokatalizáló anyag kutatásában a fő fejlesztő országok: Japán, USA, Dél-Korea, Anglia, Franciaország, Olaszország.

Katalizátor anyaga – szabadalom csoportok

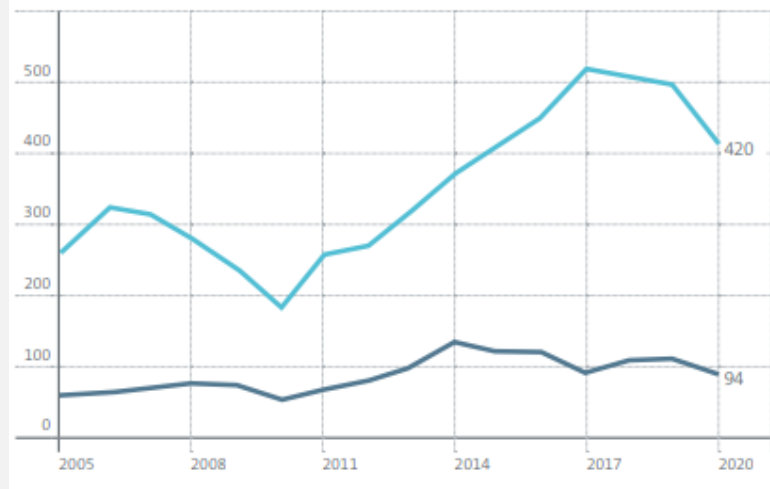


2005 és 2020 közötti nemzetközi szabadalom trendek a katalizátorok fejlesztésének témájában, felosztva a kutatási területek alapján. Nemes fém katalizátorok (oxidok beleértve) —, Nem nemes fémek, ötvözetek és kerámiák —, Szerves, gyémánt és nem gyémánt —

Fejlesztési területek, szabadalmak: Szeparátorok anyaga

- A **szeparátorok az elektrolizálók másik kulcsfontosságú elemei**, és innovációra van szükség ezen a területen a hatékonyság növeléséhez és a költségek csökkentéséhez. A legnagyobb **kompromisszum a difragma/membrán szerkezete hatékonyságát között áll fenn**.
- Vastagabb membránok** használata a **mechanikai ellenállásra** és az **élettartamra pozitív hatással** van az, de másrészt növeli a töltések mozgásával szembeni ellenállást és ezért csökkenti a hatékonyságot.
- Ugyancsak **problémát jelenthet a vékonyabb membrán esetén a gázáteresztés**, ami hatékonysági problémákat okozhat. Két csoportra oszthatóak a szabadalmak ebben a témában:
 - Kerámia alapú membránok
 - Polimer alapú membránok
- A **polimer membránok lehetőséget adnak a vékonyabb membrán rétegek kialakítására**, ezért a fejlesztések nagyobb számban ezen a területen történnek.

Szeparátorok anyaga – szabadalom csoportok



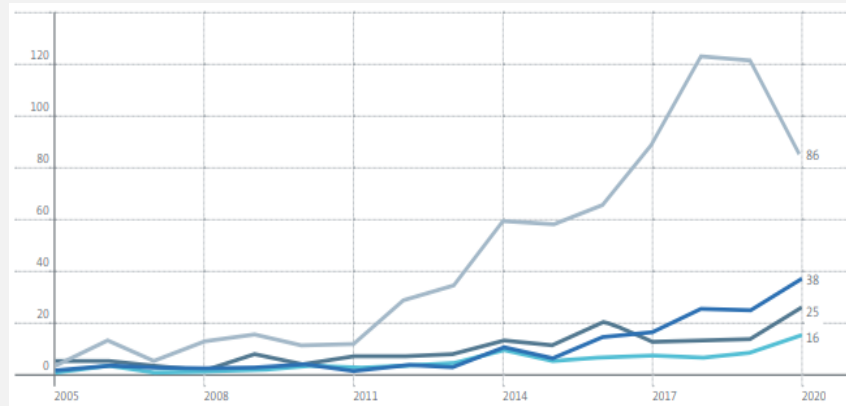
2005 és 2020 közötti nemzetközi szabadalom trendek a szeparátorok fejlesztésének témájában, felosztva a kutatási területek alapján.

Szerveetlen (kerámiák) — , Polimerek (szerves) —

Fejlesztési területek, szabadalmak: Cellák kapcsolása

- Egy elektrolizáló egységben **a különböző cellák sorba kapcsolva állnak** és az azokon áthaladó áram termeli a hidrogént. A cellák sorba kapcsolásának („stack-elésének”) a technikai megoldása **nagyban befolyásolja a hatékonyságot**.
- A sorba kapcsolt elektrolizáló cellák rendszere **felelős a berendezés árának 45%-áért**, így a technológiai újítások nem csak hatékonyság növeléshez hanem az előállítási költség csökkenéséhez is vezethet. A szabadalmak csoportosíthatóak a cella elválasztását szolgáló bipoláris elemek alapján:
 - Bipoláris elem: elektróda
 - Bipoláris elem: elválasztó lemez (plates)
 - Bipoláris elem: membrán
 - Nincs bipoláris elem
- A GW skálán, **automatizáltan gyártott sorba kapcsolt cellák megjelenése költségcsökkentést érhet el** a méretgazdaságosság révén. A Stackek fejlesztésére beadott szabadalmak számának növekedése 2012 után indult meg, ekkor kapott ez a téma nagyobb hangsúly a fejlesztésben.
- A szabadalmi bejegyzések legutóbbi csökkenése annak az eredménye lehet, hogy a **kompaktság/megtakarított tér előnyei** és a technológia magas **hozamai** már **elérték egy optimális szintet**.

Cellák kapcsolása – szabadalom csoportok



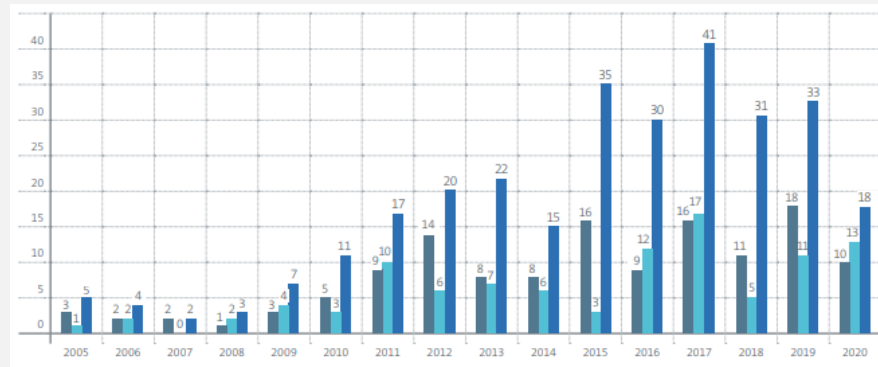
2005 és 2020 közötti nemzetközi szabadalom trendek a cella kapcsolás fejlesztésének témájában, felosztva a kutatási területek alapján.

Bipoláris elem: elektróda — , Bipoláris elem: elválasztó lemez (plates) — , Nincs bipoláris elem — , Bipoláris elem: membrán —

Fejlesztési területek, szabadalmak: Fotoelektrolízis

- A fejlesztések és szabadalmak egyik csoportja a fotoelektrolízis témájában történnek. **Víz-fotoelektrolízis, félvezető fényelektrodák felhasználásával, fenntartható és tiszta megközelítés** a hidrogéntermeléshez. A kutatások három különböző területe:
 - fotoelektrolízis, amely során fotovoltaiikus napelemet használnak
 - fotoelektrolízis, amely során egy fotoabszorberrel rendelkező fotoelektrodát használnak
 - fotoelektrolízis, amely során fotoelektrokatalizátort alkalmaznak.
- A fotoelektrolízis fejlődésével versenyképessé válhat a kék és szürke hidrogénnel szemben.** 2015 és 2017 között jelentős ugrás volt tapasztalható a fotoelektrolízis szabadalmi bejegyzések számában, különösen a fotovoltaiikus energiát felhasználó fotoelektrolízis kategóriában.

Fotoelektrolízis – szabadalom csoportok



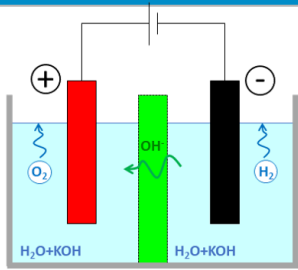
2005 és 2020 közötti nemzetközi szabadalom trendek a fotoelektrolízis fejlesztésének témájában, felosztva a kutatási területek alapján:

- Fotoelektrolízis, amely során egy fotoabszorberrel rendelkező fotoelektrodát használnak —
- Fotoelektrolízis, amely során fotoelektrokatalizátort alkalmaznak —
- Fotoelektrolízis, amely során egy fotoabszorberrel rendelkező fotoelektrodát használnak —

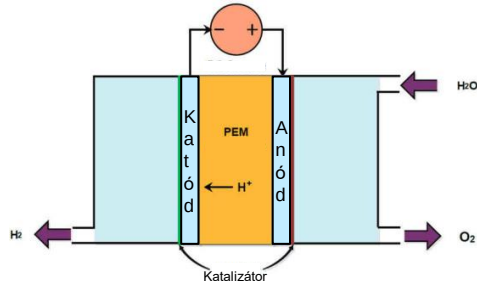
Elektrolizáló technológiák - Alacsony TRL technológiák

Hidrogéntermelő elektrolizáló technológiák

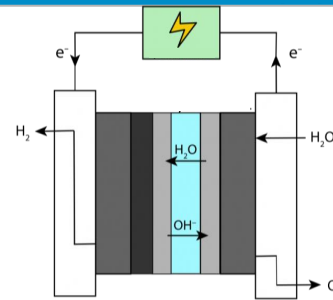
Alkáli/Lúgos elektrolízis



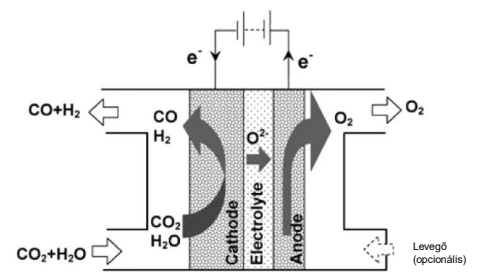
PEM elektrolízis



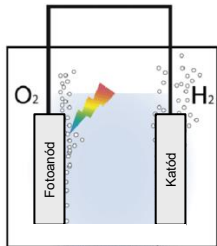
AEM elektrolízis



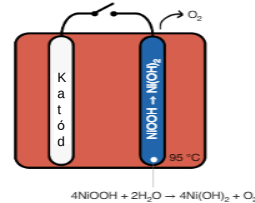
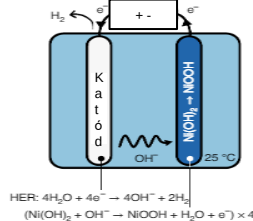
SOEC elektrolízis



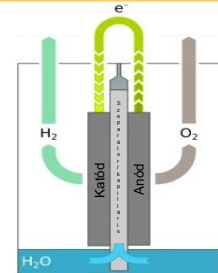
Fotoelektrokémiai vízbontás



E-TAC



CFE

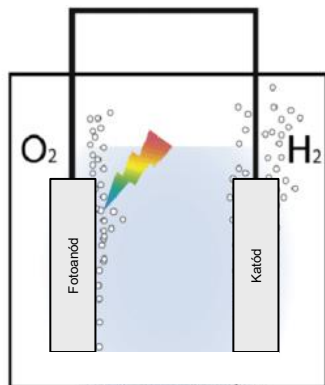


Fotoelektrokémiai cella

Elektrolizáló
technológia

Fotoelektrokémiai cella

» PV erőmű és elektrolizáló egyben



Műszaki folyamat leírása

- A fotoelektrokémiai cella a napenergiát hidrogéngáz formájában kémiai energiává alakítja, amely tiszta és megújuló üzemanyagként használható.
- A folyamat egy fotoelektrokémiai cellában zajlik, amely két elektrolit oldatba merített elektródából áll, amelyeket külső áramkör köt össze. Az egyik elektróda félvezető anyagból készült, amely képes elnyelni a fényt és elektron-lyuk párokat hozni létre. A másik elektród általában egy fém vagy fém-oxid, amely képes katalizálni a vízhasadási reakciót.
- Amikor fény világít a félvezető elektródán, az elektronokat és a lyukakat belső elektromos tér választja el egymástól, amelyet a félvezető és az elektrolit érintkezése hoz létre. Az elektronok a külső áramkörön keresztül a katódra áramlanak, ahol a vízmolekulákat hidrogéngázzá redukálják. A lyukak az anódra költöznek, ahol a vízmolekulákat oxigéngázzá oxidálják.
- A természetes fotoszintézist utánozza, és képes csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását és a fosszilis tüzelőanyag-függőséget.

Technológiai érettség

TRL 3-5



» Alacsony TRL, labor méretben létezik

2023



TRL 6-7

2030

Technológiai
fejlesztések területe

» Alacsony hatékonyság, félvezető
elektróda korrózióállósága

Előnyök

- Nem igényel külső áramforrást
- Gyakori és olcsó anyagokat használ fel

Korlátok

- Alacsony hatásfok
- Magas költségek
- Gyenge stabilitás
- Félvezető cella korrózióállósága

Revisiting solar hydrogen production through photovoltaic-electrocatalytic and photoelectrochemical water splitting; [Zhiliang Wang](#), ; [Yuang Gu](#) & [Lianzhou Wang](#)

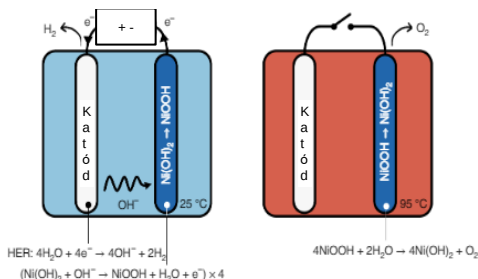
Minggu, L. J., Wan Daud, W. R., & Kassim, M. B. (2010). An overview of photocells and photoreactors for photoelectrochemical water splitting. International Journal of Hydrogen Energy, 35(11), 5233–5244.
doi:10.1016/j.ijhydene.2010.02.13

E-TAC (elektrokémiai - termikusan aktivált kémiai vízbontás)

Elektrolizáló technológia

E-TAC

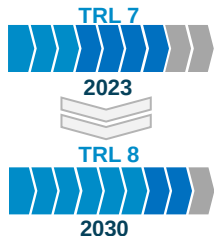
» Külön-külön kontrollált elektródfolyamatok



Műszaki folyamat leírása

- Az E-TAC elektrolízis egy új technológia hidrogén előállítására vízből elektromos áram és hő felhasználásával. A hagyományos elektrolízissel ellentétben az E-TAC elektrolízis két különböző lépésben választja el a hidrogén- és oxigéntermelést, ami hatékonyabbá, biztonságosabbá és skálázhatóbbá teszi.
- Az első lépés egy elektrokémiai folyamat, ahol a vizet hidrogénionokra (H^+) és hidroxidionokra (OH^-) bontja az elektródokon. A hidrogénionok a katódon összegyűlnek és hidrogéngázt (H_2) képeznek, míg a hidroxid ionok egy nikkel alapú anóddal reagálva nikkel-oxihidroxidot (NiOOH) és elektronokat képeznek. Ez a lépés áramot fogyaszt, de nem termel oxigéngázt (O_2).
- A második lépés egy termikusan aktivált kémiai folyamat, ahol a NiOOH anódot felmelegítik és nikkel-hidroxiddá ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) és oxigéngázzá (O_2) bomlik. Ez a lépés nem fogyaszt áramot, hanem hőt bocsát ki. A $\text{Ni}(\text{OH})_2$ anód újra felhasználható az elektrokémiai folyamat következő ciklusában.
- E-TAC elektrolízisnek nagy az energiahatékonysága, mivel az oxigént termikusan állítja elő, nem pedig elektrokémiai úton, ami csökkenti az energiaveszteséget.
- Nincs szükség membránra a hidrogén és az oxigén elválasztásához, ami leegyszerűsíti a tervezést és csökkenti a készülék költségeit és karbantartását. Az így elválasztott hidrogén és oxigén gáz csökkenti a robbanásveszélyességet

Technológiai érettség



» Jelenleg egy cég rendelkezi (H_2Pro) pilot projekttel

Technológiai fejlesztések területe

» Méretnövelés és megvalósíthatóság nagy méretben

Előnyök

- Membrán/difragma mentes gáz termelés
- Energiahatékonyság - csak a $2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2$ átalakuláshoz szükséges elektromos áram

Korlátok

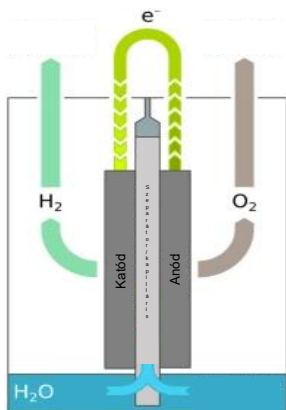
- Magas hőmérséklet (95°C) szükséges
- Alacsony hidrogén tisztaság (99.5%)
- A méretnövelés nem megoldott
- Alacsonyabb áramsűrűség ($0,5 \text{ A/cm}^2$)

CFE (Kapilláris táplálású elektrolízis)

Elektrolizáló
technológia

CFE

» Kapilláris effektus kihasználásával nagy hatékonyság érhető el



Műszaki folyamat leírása

- A CFE elektrolízis a kapilláris táplálású elektrolízis rövidítése, a víz elektrolízis egy új koncepciója, amely porózus, hidrofil szeparátort használ az elektródák vízellátására kapilláris hatás révén. Ez buborékmentes működéshez (kiküszöbölve ezzel a buborékok által létrehozott hatékonyság csökkenést) és magas energiahatékonysághoz vezet.
- A CFE elektrolízis egyszerűsített működéssel rendelkezik és könnyen felskálázható, telepíthető
- A CFE technológia egy ausztrál start-up vállalat (Hysata) szabadalma jelenleg. Az elektrolizáló rendszer tervezésekor a gyártási folyamat egyszerűsítése, a méretezést és a telepítést, és 95%-os teljes rendszerhatékonyságának volt a fő szempont. A Jelenlegi termelési hatékonyság 41,5 kWh/kg-nak felel meg, szemben a meglévő elektrolizáló technológiák 75%-ával vagy kevesebbrel. A hidrogéntermelők számára ez jelentősen csökkentheti a zöld hidrogén előállításának tőke- és működési költségeit.
- A CFE elektrolízis magas hőmérséklet, nagy áramsűrűség és magas pH környezetben működik. Ezek a körülmények a cella anyagok korrózióját okozhatják, amiért nagy CAPEX-et igényelnek a cellakomponensek, például a porózus szeparátorok, az elektródok és a katalizátorok.

Technológiai érettség

TRL 3-4



- » Pilot projekt szükséges, a megvalósíthatóság bemutatására

2023



TRL 6-7



2030

Technológiai
fejlesztések területe

- » Méretnövelés és megvalósíthatóság nagy méretben

Előnyök

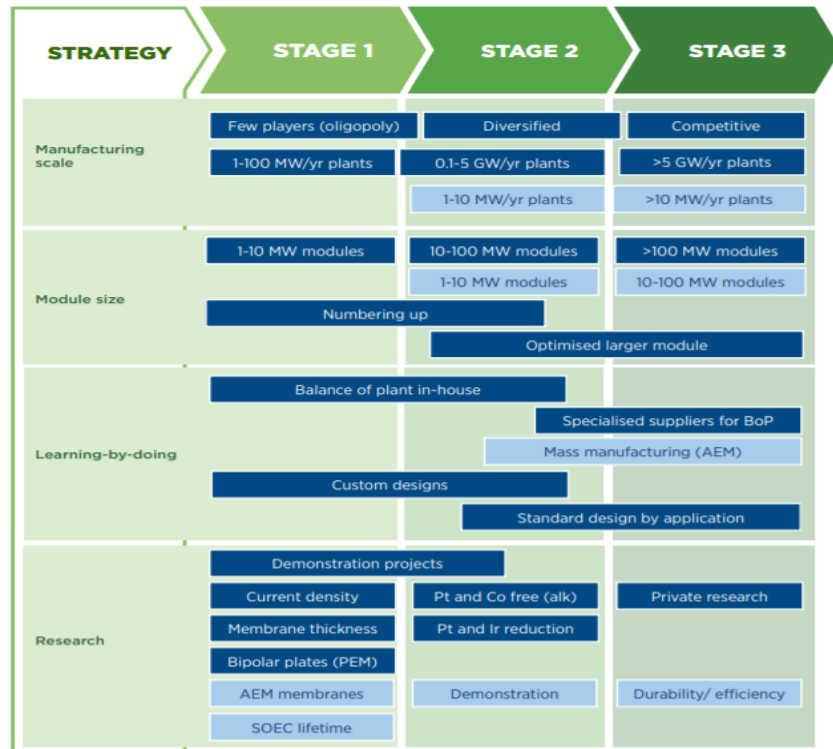
- Magas hatékonyság
- Buborékmentes működés
- Egyszerűsített tervezés és méretnövelés

Korlátok

- Magas CAPEX
- Sűrű karbantartás, nem fenntartható működés

Az elektrolízis technológia versenyképességének megteremtése négy kulcs terület fejlesztését igényli

ELEKTROLÍZIS TECHNOLÓGIÁK KÖLTSÉGCSÖKKENTÉSI ROADMAPJE



Az elektrolízis technológiák költségcsökkentési roadmapje négy stratégiai terület fejlődésén keresztül, valósulhat meg:

1) Gyártási kapacitások

- A jelenleg koncentrált piacra számos új szereplő lép be a közeljövőben.
- A jelenlegi gyártási folyamat sok manualitást igényel és kis kapacitásúak. A jelentkező projektigények kielégítése problémát okoz.

2) Modul méret

- A jelenleg elérhető elektrolizáló modulmérete relatíve alacsony. Ezek ideális kapacitást biztosítanak egy töltőállomás ellátására, azonban kevésbé alkalmasak a meglévő nagyméretű fosszilis alapú technológiák egyszerű kiváltására.
- A nagy kapacitású projekteket kisebb méretű elektrolizáló összekapcsolásával tudják teljesíteni a gyártók.
- A modul méretek növelése ezért fontos és kiemelt cél.

3) Tanulási görbe

- Jelenleg kevés tapasztalat van az elektrolízis technológiában és számos új alkalmazási területe van a hidrogénnek, amihez az elektrolizálókat is igazítani kell. Ezek sokszor egyedi projektmegoldások, amik extra költségekkel járnak. A felhasználási cél alapján standardizáció szükséges.

4) Kutatás

- Mivel a technológia fejlettsége korai fázisban van, ezért KFI területen relatíve gyors és jelentős technológiai fejlődés érhető el.

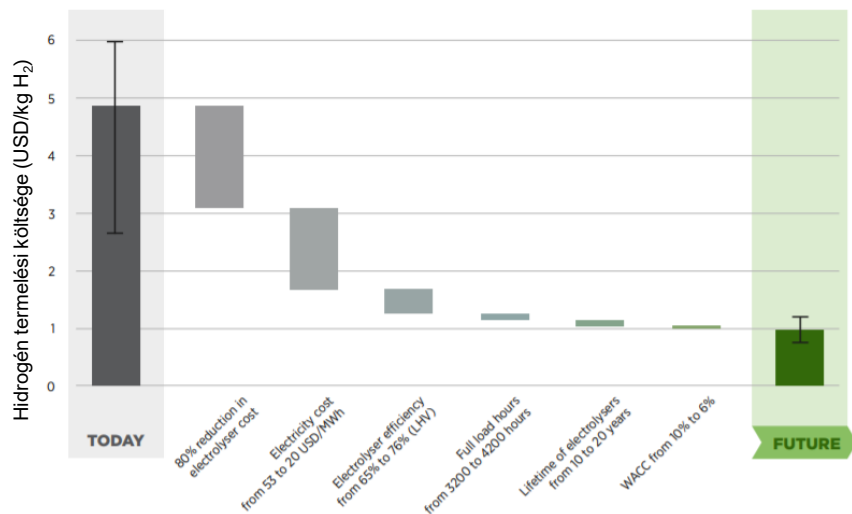
■ AEL és PEM elektrolizáló

■ HTEL / SOEC elektrolizáló

A zöld hidrogén akkor lesz versenyképes, ha jelentősen csökken az elektrolizálók és a villamosenergia ára

MITŐL LESZ VERSENYKÉPES A ZÖLD HIDROGÉN?

A zöld hidrogén versenyképességére ható tényezők



Megjegyzés: A bemutatott diagram a következő feltételezésekkel él: 130-770 USD / kW befektetési költség, 65-76%-os hatékonyság (LHV), 20-53 USD / MWh villamosenergia ár, 3.200-4.200 órás kihasználtság (onshore szél), 6-10%-os WACC.

Forrás: IRENA, 2020

- A zöld hidrogén árának drasztikus csökkenését a szakértők alapvetően két tényezőtől várják: **Elektrolizálók költségének csökkenése** és a **hidrogénelőállításához használt villamosenergia költségének csökkenése**.
- Az elektrolizálók gyártási költségének akár 80%-os csökkenése is megvalósulhat az IRENA szerint.
- Ezen felül jelentősen javíthatja a zöld hidrogén versenyképességét a villamosenergia költségeinek jelentős (több, mint 50%-os) csökkenése.
- Az **elektrolizáló technológia fejlődése** is képes közvetlenül a hidrogén előállítási árát csökkenteni.
- Magasabb hatásfok elérése: 65% → 76%
- Elektrolizálók kihasználtságnak javulása: 3200 → 4200 óra/év
- Élettartam növekedése: 10 → 20 év

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
– Zöldhidrogén fogalma és előnyei (fenntarthatósági hatása)	4
– Elektrolízis folyamata és működése (műszaki alapjai)	7
– Elektrolizáló technológiák összehasonlítása	35
– Piaci szereplők az elektrolizáló technológiákban	38
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

Elektrolizáló technológiák összehasonlítása - összefoglalás

Az elektrolizáló technológiák legfontosabb adatai:

	Alkáli	PEM	AEM	SOEC
Elektrolit	KOH oldat (20–40 m/m%)	Proton cserélő membrán	Anion cserélő membrán	Szilárd elektrolit, pl kerámia, oxid ion vezető
Katód	Ni, Ni–Mo ötvözet	Pt, Pt–Pd	Ni és Ni ötvözet	Ni alapú kerámia (Ni-YSZ és Ni-SDC/GDC)
Anód	Ni, Ni–Co ötvözet	RuO ₂ , IrO ₂	Ni, Fe, Co oxidok	
Cella elválasztó	Diafragma	PEM	AEM	Szilárd kerámia/oxid elektrolit
Áramsűrűség (A cm ⁻²)	0.2–0.4	0.6–2.0	0.2–1.0	1.5–4
Működési hőmérséklet(°C)	60–80	50–80	50–60	700-900
Működési nyomás (bar)	1–30	30–76	1–30	1–30
Hidrogén termelés (Nm ³ h ⁻¹)	<760	<40	<1	<1
Gáz tisztaság (vol%)	>99.5	>99.9999	>99.99	>99.999
Rendszer válasz	másodperc	ezredmásodperc	na	ezredmásodperc
TRL	9	7-8	6	6

A tőkeköltségek csökkentése továbbra is kritikus az elektrolizálók bevezetése szempontjából, miközben a rendszer hatékonysága és a kritikus ásványi anyagok intenzitásának csökkentése javult.

Elérhetőség és fejlettség: Az alkáli és PEM (protoncserélő membrán) elektrolizálók már kereskedelmi forgalomban elérhetők. Az alkáli elektrolizáló hosszabb múltra tekint vissza, mivel azt már a klóralkáli iparban is használták. Mindkét technológia azonos technológiai készültségi szinten van (TRL9), de további politikai támogatásra és fejlesztésekre van szükségük a versenyképesség fenntartásához.

Szilárd oxigénelektrolízis (SOEC): A SOEC technológia gyorsan fejlődik és közeledik a kereskedelmi forgalomba hozatalhoz. Egyre nagyobb méretű SOEC rendszereket telepítenek, és ezek a technológiák ígéretesek lehetnek az ipari méretekben történő hidrogén előállításban.

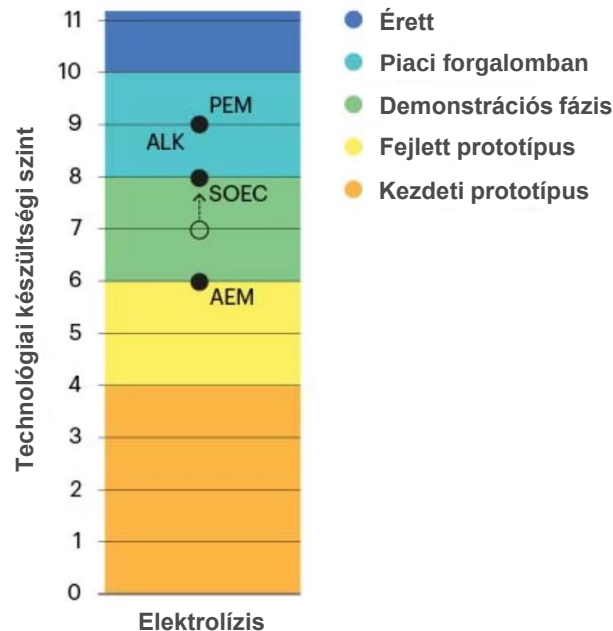
Anioncserélő membrános (AEM) elektrolízisek: Az AEM elektrolízisek fejlesztése még korai szakaszban van, és jelenleg csak kis mennyiségben állnak rendelkezésre. Néhány cég azonban nagyüzemi méretű gyártási kapacitást tervez.

Költségek: Az elektrolizálók tőkeköltségeit nehéz összehasonlítani, de a költségek általában csökkennek a technológia fejlődésével és a gyárak méretének növekedésével. Az alkáli technológia általában olcsóbb, mint a PEM technológia, de mindkettő költsége csökkent az elmúlt években.

Hatékonyság: Az alkáli és PEM elektrolizálók hasonló hatékonysággal működnek, és rugalmasan működhetnek megújuló energiával összekapcsolva. A SOEC rendszerek magasabb elektromos hatásfokot érnek el, különösen a hulladékhő hasznosításával.

Innováció: Az új katalizátorbevonatok és membránmentes elektrolízis technológiák fejlesztése folyamatban van, amelyek lehetővé teszik az irídium és platínacsoportba tartozó fémek használatának csökkentését, és növelhetik a rendszerek élettartamát.

Az elektrolizálók technológia készültségi szintjei



Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
– Zöldhidrogén fogalma és előnyei (fenntarthatósági hatása)	4
– Elektrolízis folyamata és működése (műszaki alapjai)	7
– Elektrolizáló technológiák összehasonlítása	35
– Piaci szereplők az elektrolizáló technológiákban	38
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

2022-ben a kínai vállalatok foglalták el az első három helyet az elektrolizáló gyártók között, 2023-ra azonban több nyugati gyártó is képes volt megelőzni őket

Elektrolizáló technológia – Piaci szereplők (1/2)

Top 20 elektrolizáló gyártó 2022 – 2023 (1/2) *

#	2022		2023	
	Vállalat	Éves kapacitás (GW)	Vállalat	Éves kapacitás (GW)
1	Longi 	1,5 (ALK)	Plug Power 	3,0 (PEM)
2	Peric 	1,5 (ALK / PEM)	Longi 	2,5 (ALK)
3	Sungrow 	1,1 (ALK / PEM)	John Cockerill 	2,5 (ALK)
4	John Cockerill 	1,0 (ALK)	ITM Power 	2,5 (PEM)
5	Thyssenkrupp 	1,0 (ALK)	Ohmium 	2,0 (PEM)
6	Auyan 	1,0 (ALK)	Cummins 	1,6 (PEM)
7	ITM Power 	1,0 (PEM)	Peric 	1,5 (ALK / PEM)
8	Plug Power 	1,0 (PEM)	Thyssenkrupp 	1,5 (ALK)
9	Ohmium 	1,0 (PEM)	HydrogenPro 	1,3 (ALK)
10	Cummins 	0,6 (PEM)	Siemens 	1,3 (PEM)

Megállapítások

- A piaci növekedés hatalmas keresletet generál, a gyártók igyekeznek bővíteni a termelési kapacitásukat.
- Az éves **gyártási kapacitás növekedése**, különösen az automatizált vagy félautomatizált gyárakban, az **előállítási költségek csökkenéséhez vezet**, ami lehetőséget teremt arra, hogy versenytársaikat alacsonyabb áron szorítsák ki a piacon.
- **2022-ben a kínai vállalatok** foglalták el az első három helyet a legnagyobb elektrolizáló gyártók között, akik **alacsonyabb munkabérekkel és költségekkel működnek**, valamint jelentős állami támogatásokban részesülnek, így eszközeik jelentősen **olcsóbbak**, mint a nyugati versenytársaké.
- **2023-ra több nyugati gyártónak** is sikerült nagyobb éves kapacitást produkálnia, mint a kínai vállalatoknak.

* A listák nem tartalmazzák azokat a vállalatokat, amelyek szilárd-oxid elektrolizálókat (SOE) gyártanak.

A hidrogénpiac bővülése és az új projektek lehetősége számos gyártót ösztönöz kapacitásbővítésre, ez azonban túlkínálathoz vezethet

Elektrolizáló technológia – Piaci szereplők (2/2)

Top 20 elektrolizáló gyártó 2022 – 2023 (2/2) *						
	2022			2023		
#	Vállalat		Éves kapacitás (GW)	Vállalat		Éves kapacitás (GW)
11	Nel		0,6 (ALK / PEM)	Sungrow		1,1 (ALK / PEM)
12	SinoHy		0,5 (ALK)	Auyan		1,0 (ALK)
13	Guofu		0,5 (ALK)	Guofu		1,0 (ALK)
14	Siemens		0,3 (PEM)	Nel		0,6 (ALK / PEM)
15	Kylin Tech		0,3 (ALK)	SinoHy		0,5 (ALK)
16	HydrogenPro		0,3 (ALK)	Sunfire		0,5 (ALK)
17	Kohodo		0,3 (ALK)	Kohodo		0,5 (ALK)
18	Sunfire		0,3 (ALK)	CPU		0,5 (ALK)
19	McPhy		0,1 (ALK)	Sunfly		0,5 (ALK)
19	Green Hyd.		0,1 (ALK)	Reliance		0,5 (ALK)

* A listák nem tartalmazzák azokat a vállalatokat, amelyek szilárd-oxid elektrolizálókat (SOE) gyártanak.

Megállapítások

- A hidrogénpiac **jelentős növekedési potenciált** hordoz magában.
- Számos gigaprojekt került beharangozásra, ami miatt **az elektrolizáló gyártók növelni kezdték a termelési kapacitást** még a valós kereslet megjelenése előtt.
- A bejelentett projektek és elektrolizáló gyártási kapacitások összevetéséből az derül ki, **hogy a legyártott elektrolizálók közel fele nem kerül kihasználásra.**
- Ez a folyamat **magas csődkockázattal** jár a gyártókra nézve. Túl lassú bővítés esetén veszélyeztetik a gigaméterű megrendelések elnyerését, túl gyors bővítés esetén pedig gyárakban lévő felszereléseket kockáztatják az óriási túlkínálattal.

A legnagyobb elektrolizáló gyártók profiljai - (1/4)



Alapítás éve: 1997

Székhely: New York, US 

Üzemanyagcellás rendszereket fejlesztenek, amelyek helyettesítik az elektromos meghajtású berendezésekben és járművekben használt hagyományos akkumulátorokat.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- PEM technológián alapuló elektrolizáló termékek és egyedi tervezésű integrált megoldások (pl. NASA űrhajók kritikus életfenntartásához).



Alapítás éve: 2000

Székhely: Kína, CHI 

Napenergia-óriás. A LONGi Hydrogen leányvállalatával nagyszabású lúgos elektrolizáló hidrogénrendszerek előállításával foglalkoznak.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- ALK Hi1 elektrolizáló: 4,3 kWh/köbméter energiatartalmú hidrogént képes előállítani.
- LHY – A1000: alkáli elektrolizáló dobozos termékük.



Alapítás éve: 1817

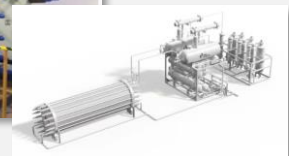
Székhely: Seraing, BEL 

Nyomás alatti lúgos elektrolizálók és gázkezelő berendezések gyártása, iparág szerint: vegyipar, acélgégyártás, erőművek. Egyszerű telepítésre kalibráltak.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- 5 MW-os egysoros túlnyomásos elektrolizáló

A vállalat 100-1000 kg kapacitású hidrogén töltőállomásokat is épít, amelyek alkalmasak buszokhoz, teherautókhoz.



A legnagyobb elektrolizáló gyártók profiljai - (2/4)



Alapítás éve: 2001

Székhely: Sheffield, UK 

Tiszta üzemanyaggal és energiatárolókkal foglalkozó vállalat, amely elektrolizálókat gyárt és integrál zöld hidrogén projektekbe. A Shell és a Linde is ITM elektrolizálókat választott zöldhidrogén projektjeihez.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- HGAS3SP (közepes méretű konténeres OEM elektrolizáló rendszer)
- 3MEP CUBE (sokoldalú elektrolizáló készülék egyedi kialakítással, megbirkózik a hőtágulással)



Alapítás éve: 2019

Székhely: Nevada, US 

Hidrogén-elektrolizáló vállalat, gyártási és kutatás-fejlesztési kiválósági központokkal rendelkezik szerte az Egyesült Államokban. Termékei ideálisak ipari, mobilitási, Power-to-X alkalmazásokhoz. O&M szolgáltatásokat is nyújtanak.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- Lotus Mark 1, Mark2 PEM hidrogénelektrolizáló: kompakt, méretezhető, nagy hatékonyságú, reteszelt moduláris rendszer, gyors telepítés, biztonságos.



Alapítás éve: 1919

Székhely: Columbus, US 

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- HyLYZER-1000: kompakt, moduláris elektrolizáló rendszer 1000-10 000 Nm³/h projektekhez. PEM technológián alapul, jól bővíthető, alacsony karbantartási igény.
- 2,5 MW-os elektrolizálót szállítanak a HysetCO-nak, az Air Liquide, idex, STEP, Toyota által alapított vállalatnak. A projekt célja a világ első nagyszabágú hidrogénmbilitása platformjának fejlesztése.



A legnagyobb elektrolizáló gyártók profiljai - (3/4)



Alapítás éve: 1966

Székhely: Handan, CHI 

Állami szintű K+F intézet, amely integrált K+F, tervezési és gyártási képességekkel, valamint H₂ generálási szolgáltatással rendelkezik.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- Hatalmas gyártóbázis, rendelkezik lúgos és PEM elektrolizálókkal is. Széles termékportfóliója hidrogénben gazdag vízgenerátort, konténeres típusú H₂ generátort és PEM típusú H₂ generátort tartalmaz.



Alapítás éve: 2015

Székhely: Dortmund, GER 

Német acélgyártó óriás, akiknek víziójuk, hogy a zöld hidrogén piacon is élszereplővé váljanak. A vállalat zöld értékláncokra vonatkozó megoldásai fontos szerepet játszanak a klímasegítség elérésében.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- Alkáli elektrolízis (AWE) modul, amely 300 hatékony cellát egyesít egy 20 MW-os rendszerben
- Klór-alkáli bipolaris membrán (BM)
- Membrán elektrolizáló technológia oxigén-depolarizált katóddal (ODC)



Alapítás éve: 2013

Székhely: Porsgunn, NOR 

Alkáli elektrolízis üzemeket szállítanak nagyipari ügyfeleknek. Jelenleg az európai piacról vannak ügyfelek, a jövőben az észak-amerikai, valamint a közel-keleti piacok fejlesztését tervezik helyi partnerekkel.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- HP-1000: Legnagyobb modul, 1000 Nm³/h hidrogéntermelési kapacitással 30 bar nyomáson. A modul 2022 szeptemberében érkezett meg a HydrogenPro testállomására, Herøya, Norvégiában, és 2023 februárjára elvégezte az első tesztet.



A legnagyobb elektrolizáló gyártók profiljai - (4/4)



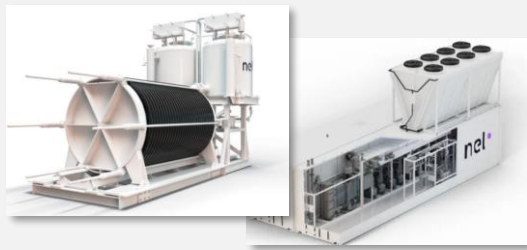
Alapítás éve: 1927

Székhely: Oslo, NOR 

Alkáli és PEM elektrolizálókat is gyártanak, néhány száz Watt-tól egészen a nagyobb rendszerekig, főképp a power-to-x és mobilitási iparágak számára.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- Konténeres PEM elektrolizáló (M széria)
- Atmoszférikus alkáli elektrolizáló (A széria)
- PEM elektrolizáló (C, H, M és S széria)



Alapítás éve: 2020

Székhely: München, GER 

A Siemens Energy AG egy energiavállalat, amelyet a Siemens Group korábbi Gáz- és Energia divíziójának leválasztásával alapítottak. A Siemens Energy a PEM elektrolízist optimalizálja különböző alkalmazásokra.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- Silyzer 300: A Siemens legújabb, legerősebb termékcsaládja, amelynek energiafogyasztása a kétszámjegyű megawatt tartományban, a termelési kapacitása pedig 100-2000 kg/év között változik.



Enapter

Alapítás éve: 2017

Székhely: Crespina Lorenzana, ITA 

Az Enapter plug-and-play elektrolizálókat fejleszt, amelyek modulárisak és egymásra rakhatók, így minden hidrogénszükségletet lefednek.

A vállalat elektrolizáló portfóliója tartalmazza:

- AEM elektrolizálók: Ideális kis léptékű/laboratóriumi méretű/kísérleti projektekhez. Az Enapter olyan anioncserélő membrán elektrolizálókat kínál, amelyek méretezhetők (egymásra rakhatók), és kis méretben (kg/óra) és 55 kg-os modulsúlyú (víz nélkül) méretben is elérhetők.

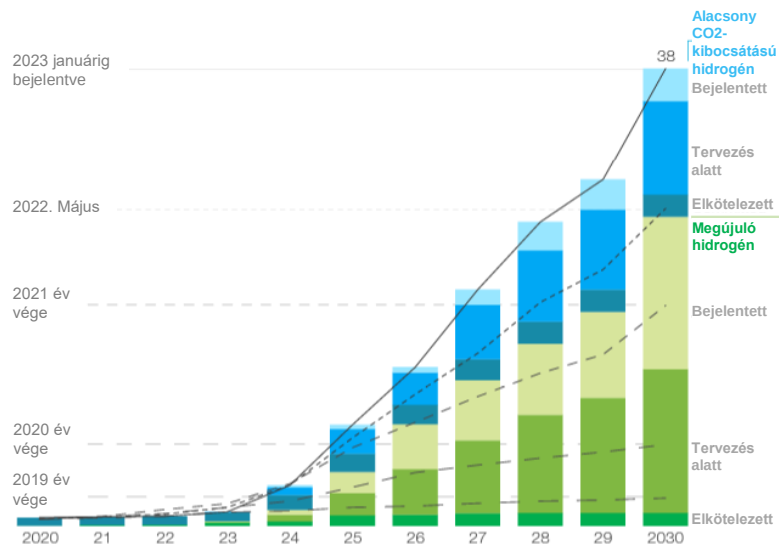


Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
— Zöldhidrogén piaci tendenciák és növekedési potenciál	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

A 2030-as évre bejelentett tiszta hidrogéntermelési tervek összesen 38 Mt éves mennyiséget tesznek ki, ami csupán a fele nettó nulla kibocsátás tervezetben felállított 2030-as céloknak

Az összes bejelentett tiszta* hidrogéntermelési kapacitás (2023, Mt / év)



- A termelési kapacitás >70%-a a top 3 régióban (Európa, Észak-Amerika, Latin-Amerika) összpontosul.
- 2030 utánra további 16 Mt kapacitás került bejelentésre.
- * Tiszta H₂ = zöld és kék hidrogén

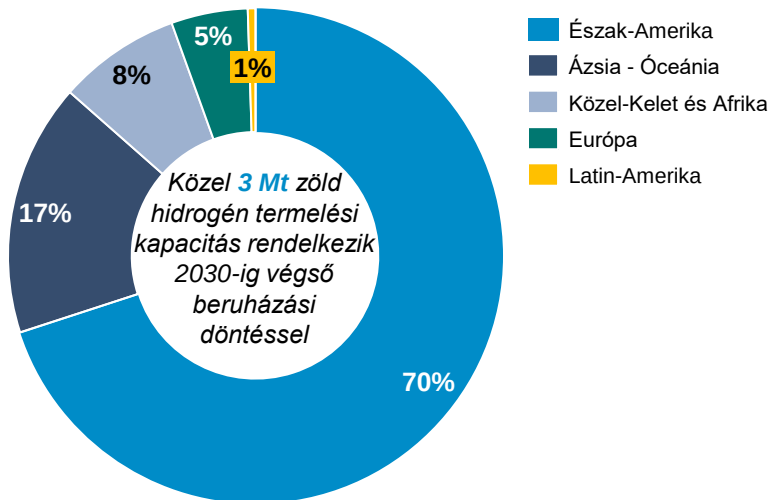
Megállapítások



- A vállalatok világszerte bejelentették a **2030-as évre** szóló tiszta hidrogéntermelési terveket, amelyek összesen **38 Mt éves mennyiséget** tesznek ki. Ez a mennyiség pusztán a fele a nettó nulla kibocsátást megcélzó tervezet 2030-ra felállított célszámainak.
- A 38 Mt éves mennyiség több mint **kétharmada zöld hidrogén** (kb. 25 Mt éves mennyiség), a maradék pedig alacsony szén-dioxid-kibocsátású (kb. 13 Mt éves mennyiség).
- A vezető régiókon kívül **2022-től megnövekedett** a megújuló energiában gazdag régiók, mint **a Közel-Kelet és Afrika projektaktivitása**.
- Az adatok előre vetítik, hogy **a projektek fejlesztése és bevezetése az előzetes becslésektől több időt vehet igénybe**. 2022 végéig mintegy 6 GW elektrolízis kapacitásnak kellett volna rendelkezésre állnia, amiből mindössze 700 MW valósult meg.

Bár több projekt is előkészítési fázisban van, a végső beruházási döntéssel rendelkező projektek száma nem túl magas, mindössze 3 Mt tisztahidrogén kapacitás 2030-ra

A végső beruházási döntéssel (FID) rendelkező projektek termelési kapacitása 2030-ig (2023)



• Észak-Amerika:

Az észak-amerikai végső beruházási döntéssel rendelkező projektek kapacitásának ~90%-át a szén-dioxid-mentes hidrogén teszi ki (amiből ~740 kt éves termelés már működik), az előállított hidrogén ammónia előállítás és kőolaj-finomítás során kerül felhasználásra.

• Ázsia és Óceánia:

- Kína az Ázsia-Csendes-óceáni régióban a végső beruházási döntéssel rendelkező projektek közel 90%-áért felelős, több nagyméretű megújuló hidrogén projekt (>100 MW) már előrehaladott állapotban van.

• Közel-Kelet és Afrika:

- A végső beruházási döntéssel rendelkező projekteket egy gigaméretű szaúd-arábiai megújuló hidrogén projekt jelenti.

• Európa:

- A végső beruházási döntéssel rendelkező projektek közel 100%-át (több mint 95%) a zöld hidrogén projektek teszik ki Európában, ahol az ipari szektorok (pl. finomítás, vegyipar) vezérlik a keresletet.

• Latin-Amerika:

- Jelentős projekttervezetekkel rendelkeznek, de még nem kötelezték el magukat a nagy léptékű projektek mellett.

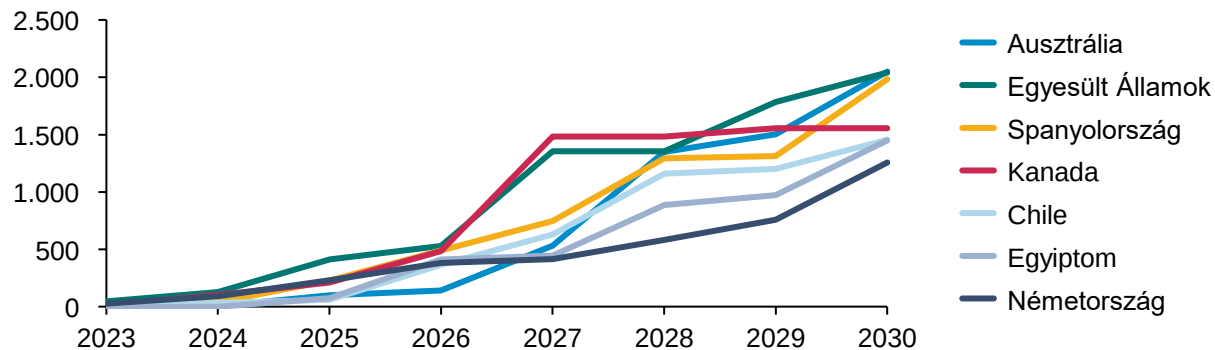
Megállapítások

- Körülbelül 2,1 Mt éves termelésű **tiszta hidrogén (zöld és kék) projekt került végső beruházási döntésre** (ebből körülbelül 1,1 Mt alacsony szén-dioxid tartalmú (kék) hidrogén, míg a fennmaradó 1 Mt éves mennyiség zöld hidrogén) **a már működő 900 kt éves kapacitás mellett. A végső beruházási döntést elérő projektek 70%-a Észak-Amerikában** található, ezek tipikusan alacsony szén-dioxid tartalmú hidrogén projektek.

Ausztrália és Spanyolország előtt jó esélyek kínálóznak arra, hogy 2030-ra a zöldhidrogénpiac vezető szereplőivé váljanak

Legnagyobb zöldhidrogén előállító nemzetek prognózisa (2023 – 2030, ezer tonna)

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Ausztrália	0,6	3,1	98,8	139,8	533,2	1348,6	1503,6	2051,2
Egyesült Államok	47,3	127,2	410,8	528	1354	1354	1785,8	2041,4
Spanyolország	1,7	38,2	228,1	489	747,2	1294,4	1314,6	1981,7
Kanada	14,7	101,7	212,1	484,4	1484,4	1484,4	1555,2	1555,2
Chile	2,6	32,5	59,4	364,9	629,9	1160,4	1201,7	1455
Egyiptom	0	0	74,2	412,8	446	885,7	973,6	1449,9
Németország	27,1	91,7	231,2	381,7	415,3	582,9	759,3	1258,7
India	2,1	30,8	231,4	502,7	957,1	1099,6	1118,2	1118,2
Brazília	0	10	136,8	255,4	601	601	851	1057,2
Marokkó	0	0	31	31,1	384,9	984,9	984,9	984,9



Megállapítások

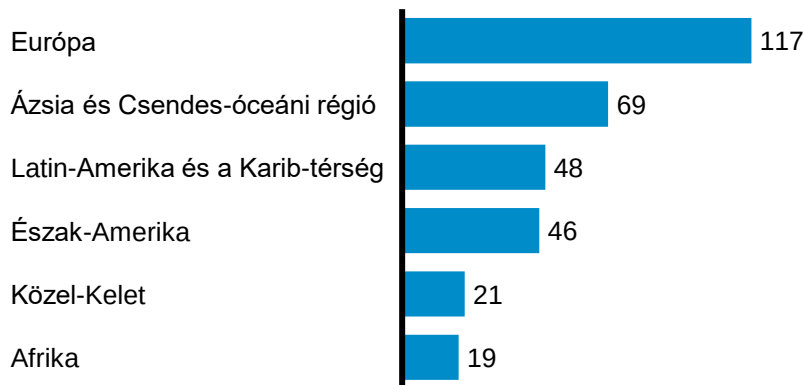
- Ausztrália** elsősorban a **2030-ban induló Australia Renewable Energy Hub-nak** köszönhetően kerül az **élszereplők közé**, 2030-ra eléri az évi 1,5 millió tonna zöld hidrogéntermelő-kapacitást.
- Spanyolország** az élvonalbeli szereplők közé főleg az **erős állami támogatások** révén kerülhet, mivel a spanyol kormány már tíz nagy projektet hagyott jóvá, köztük a **Fertiberia** és az **Iberdrola Puertollano projektjét**, amelyet 2022-ben helyeztek üzembe, és várhatóan 200 ezer tonna zöld hidrogént termel majd évente.
- A megújuló energia nagyhatalom **Kína nem került be a 2030-as tízes listára**, elsősorban Peking jelenlegi céljai miatt, miszerint 2025-től évente 200 000 tonna zöld hidrogént állítanak elő. Ez a **cél elmarad az EU és az Egyesült Államok 10 millió tonnás termelési céljától**.

A zöldhidrogén beruházásokban Európa és Ausztrália vállalnak vezető szerepet

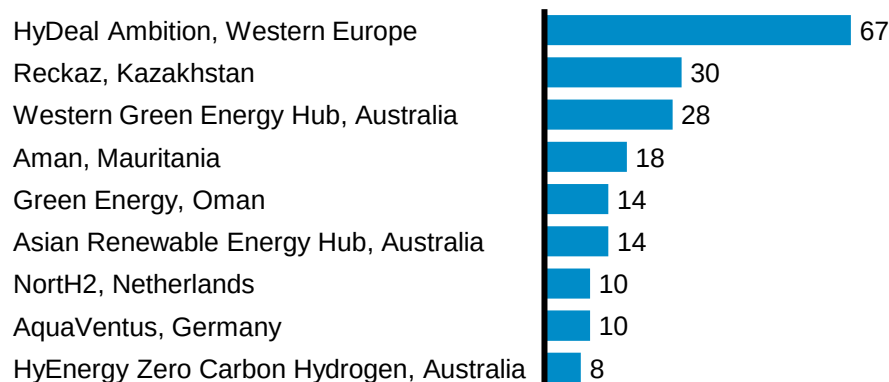
Zöldhidrogén piacelemzés 2022 – Projektek



Bejelentett hidrogénprojekt beruházások 2030-ig, régiók szerinti bontásban (2023, mrd USD)



A legnagyobb tervezett zöldhidrogén beruházások (2022, GW)

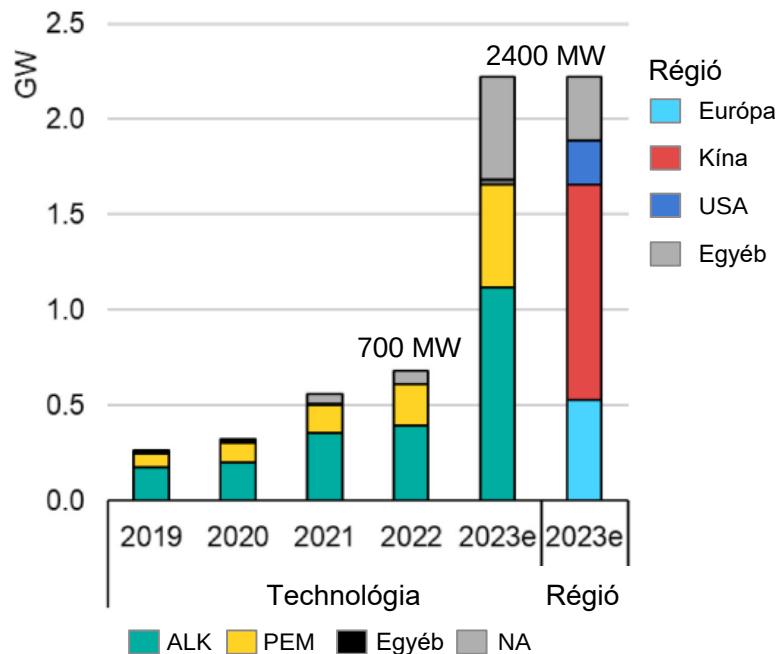


Megállapítások

- 2022-ig a **HyDeal Ambition projekt** a legnagyobb bejelentett zöld hidrogén projekt. A vállalkozást **energia- és építőipari cégek konzorciuma** vezeti, ideértve a földgázszállító **Enagás-t**, valamint az infrastruktúra- és koncesszióírási **Vinci Construction-t**.
- A globális nagy léptékű zöld hidrogén **projekthálózat összesen közel 260 gigawatt** kapacitással rendelkezik, **legtöbb projekt Európában és Ausztráliában** foglal helyet.
- **Európa 36 százalékát tette ki** a világszerte bejelentett hidrogénprojektekbe történő beruházásoknak, **ami 2030-ig 117 milliárd USD** értéket képvisel.

A globálisan telepített elektrolizáló kapacitás több, mint 3-szorosára növekszik 2023-ban

Globális telepített elektrolizáló kapacitás technológia és régió szerint (2023; bejelentett projektek)

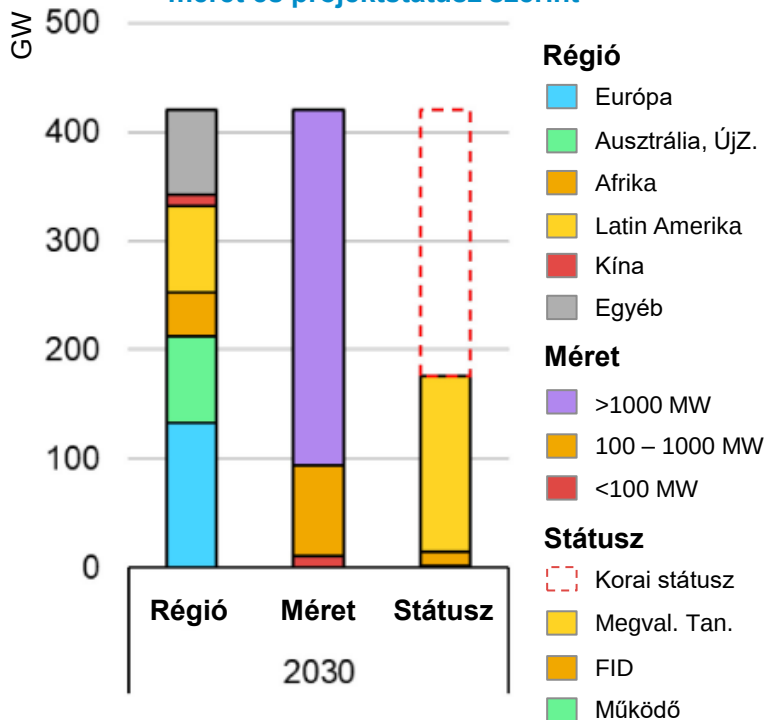


Megállapítások

- 2022 végére a hidrogén elektrolizálók globálisan telepített kapacitása megközelítette a **700 MW-ot**, ami 20%-os növekedést jelent az előző évhez képest. 2022-ben 120 MW összkapacitású üzem kezdte meg működését. Ez csak nagyjából fele a 2021-ben tapasztalt új kapacitásbővítéseknek; 2021 azonban kivételes év volt, amikor egyetlen 150 MW kapacitású projektet helyeztek üzembe Kínában.
- A **2023-ban üzembe helyezett legnagyobb elektrolízisüzemek listáját valószínűleg ismét Kína vezeti majd**: a **Sinopec 260 MW-os erőműve** 2023 júliusában kezdte meg működését, és több mint 550 MW-os projektek vannak építés alatt.
- A jelenleg legalább FID-t elért vagy építés alatt álló projektek alapján **a beépített globális kapacitás 2023 végére megháromszorozódhat, összesen több, mint 2 GW-ra nőhet** (ami körülbelül 0,2 Mt hidrogéntermelésnek felel meg), feltéve, hogy valamennyi projekt a tervek szerint valósul meg, bár számos projekt csúszásban van.
- 2022 végére **a beépített elektrolizáló kapacitás 60%-át az alkáli technológia teszik ki**, ezt követik a protoncserélő membrános (PEM) elektrolizáló mintegy 30%-kal.
- A bejelentések alapján ez a helyzet a következő években várhatóan változni fog. A PEM elektrolizálók piaci részesedése növekedni fog az alkáli elektrolizálókkal szemben, bár számos jövőbeli projekt még nem döntötte el vagy nem hozta nyilvánosságra, hogy melyik technológiát fogja alkalmazni.
- A szilárdoxid-elektrolizáló (SOEC) ma a beépített kapacitás kevesebb mint 1%-át teszi ki. A földrajzi megoszlást tekintve Kína és Európa a 2022 végi beépített kapacitás egyharmadát, míg az Egyesült Államok és Kanada együttes részesedése 10%-ot tesz ki.

2030-ra már többszáz GW-nyi elektrolizáló kapacitás állhat üzembe a bejelentett projektek alapján

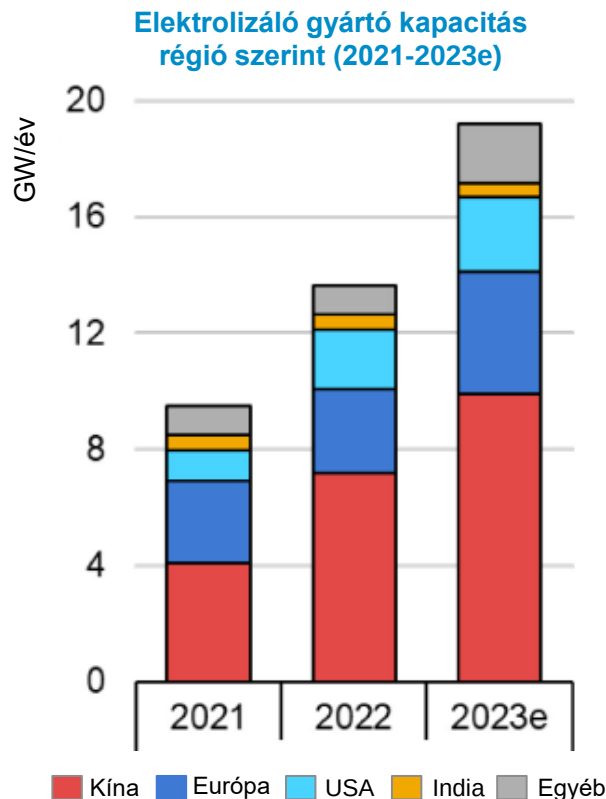
2030-ra bejelentett elektrolizáló kapacitások régió, méret és projektstátusz szerint



Megállapítások

- A bejelentett projektek alapján a globális telepített elektrolízis-kapacitás 2030-ra elérheti a 175 GW-ot, ami 30%-os növekedést jelent a 2022. évi Global Hydrogen Review jelentésekhez képest. **A 2030-as kapacitás 420 GW-ra nő, ha a fejlesztés korai szakaszában lévő projekteket is figyelembe vesszük.** A 2030-ra kitűzött kapacitások több, mint fele korai fejlesztési fázisban vannak.
- A 2030-ra várható beépített kapacitás egyharmada Európába kerülhet, majd Latin-Amerika és Ausztrália következik egyenként 20%-kal. A Kínában a közelmúltban elért eredmények és az Egyesült Államokban az inflációcsökkentő törvény (IRA) hatása azonban valószínűleg megváltoztatja ezt a képet, és ez a két ország várhatóan nagyobb részt fog kitenni a teljes beépített kapacitásból, mint ami a ma bejelentett projektekből látható.
- Az összes bejelentett projekt megvalósulása még mindig nagyon bizonytalan, mivel a bejelentett projektek kapacitásának kevesebb mint 4%-a érte el az FID fázist** vagy van építés alatt. A bejelentett kapacitások közel 40%-a már elkészítette a megvalósíthatósági vizsgálatot vagy épp kidolgozás alatt áll.
- A Global Hydrogen Review legutóbbi, 2022. szeptemberi kiadása óta több mint 3,8 GW elektrolízis projekt elérte az FID fázist vagy megkezdődött kivitelezés. Ez főként a szaúd-arábiai NEOM Green Hydrogen Project építésének megkezdésének köszönhető, amely a tervek szerint 2026-ban lép működésbe, és amely a világ legnagyobb projektje, amelynek építése megkezdődött. Továbbá a közelmúltban lett nyilvános, hogy biztosított az ománi Green Hydrogen projekt a finanszírozása, amely várhatóan évi 100 kt ammóniát fog termelni, és a tervek szerint teljes üzemméret elérése után 3,5 GW kapacitással fog rendelkezni.
- Az elmúlt év bejelentett projektjei alapján elmondható, hogy a piac nagyméretű (>1GW) projektek felé fordul.** Míg az elektrolízisüzemek átlagos mérete ma körülbelül 12 MW, néhány éven belül több száz MW-ra, 2030-ra pedig 1 GW-ra nőhet, és a 2030-ra bejelentett kapacitások több mint 75%-át a GW-méretű projektek teszik ki.

2022 végére már évi 14 GW elektrolizálógyártó-kapacitás állt rendelkezésre globálisan, melynek fele Kínában található

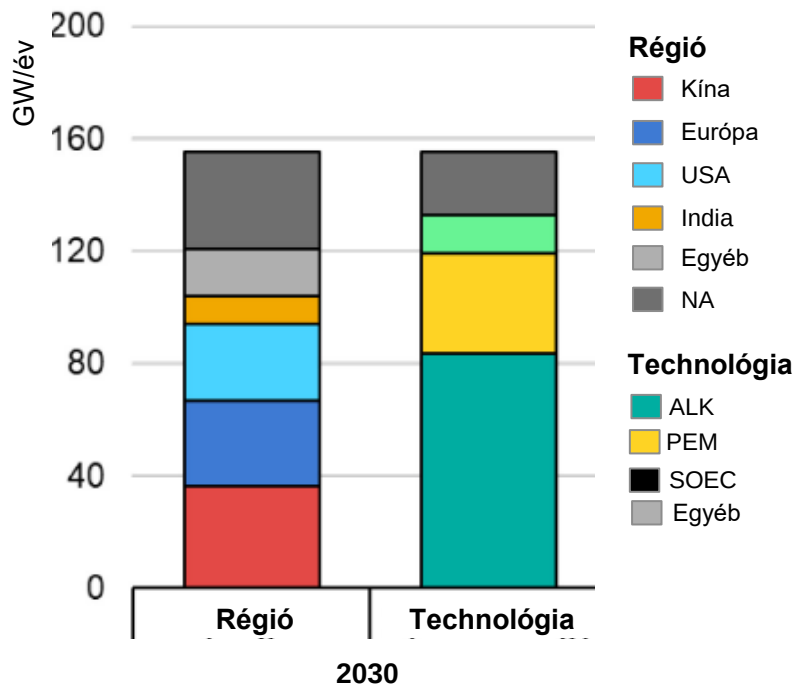


Megállapítások

- 2022 végére az elektrolizálógyártók által meghirdetett rendelkezésre álló gyártókapacitás elérte a 14 GW/év értéket, amelynek fele Kínában van, a gyorsan növekvő belföldi piac kiszolgálására, további egyötöde pedig Európában
- A gyárak eddigi tényleges termelése azonban ennél jóval alacsonyabb: becslések szerint 2022-ben alig több mint 1 GW/év lehetett az output a zöld H2 projektek üzembe helyezését figyelembe véve és a klóralkáli elektrolízisek piaca alapján, amelyek továbbra is dominálják a gyári termelést.
- Ennek ellenére úgy tűnik, hogy **elegendő kapacitás áll rendelkezésre a 2023-ra tervezett, építés alatt álló 1,1 GW-os és a 2024-re tervezett 5 GW-os projektek megvalósításához**. Tekintettel a jelenlegi termelés és a gyártók által bejelentett gyártási kapacitások közötti nagy különbségre, az is megvalósíthatónak tűnik, hogy a gyártók két-három éven belül több gigawattal növelhetik a termelésüket, ha megrendeléseket kapnak az észak-amerikai és európai pénzügyi ösztönzőket kihasználni kívánó projektektől.
- A globális **gyártási kapacitások háromnegyede ma alkáli elektrolizáló gyártására specializált - ennek 70%-a Kínában található**. A globális **PEM elektrolizáló gyártási kapacitás jelenleg 2GW/év, a SOEC pedig 1,5 GW/év**. E két technológia gyártási kapacitásának egy részét azonban - a technológiai hasonlóságok miatt - ugyanazon üzemekben üzemanyagcellák gyártására használják, ami azt jelenti, hogy az elektrolizálókra használt kapacitás alacsonyabb lehet.

A globális gyártási kapacitások 2030-ra elérhetik az évi 155 GW méretet a bejelentések alapján

2030-ra bejelentett elektrolizáló gyártó kapacitás
régió és technológia szerint

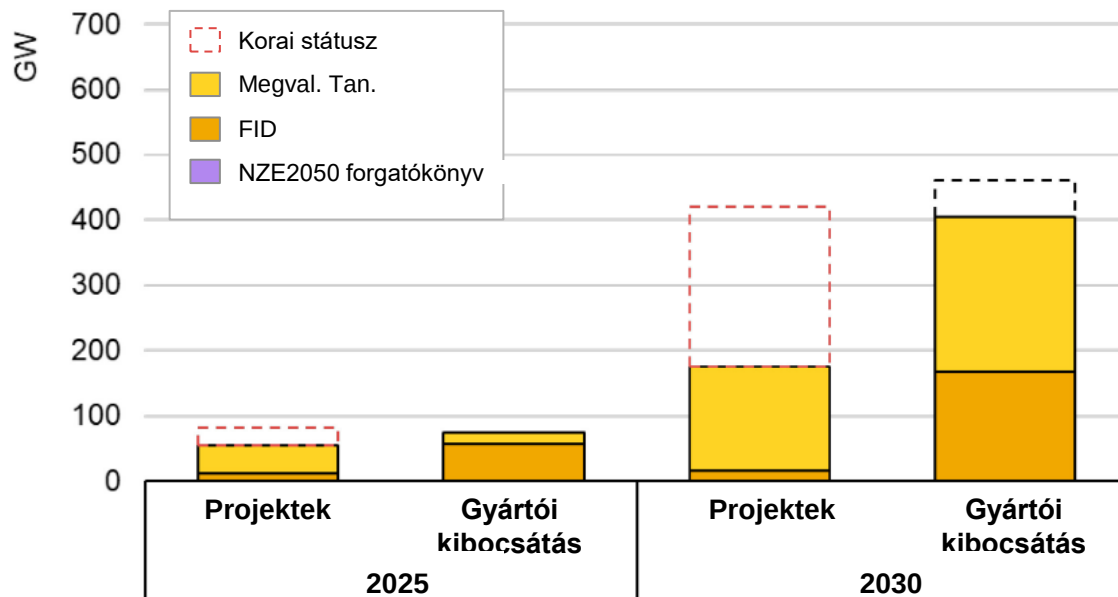


Megállapítások

- A vállalatok bejelentései alapján a **globális elektrolizáló gyártási kapacitás 2030-ra elérheti a 155 GW/év értéket**. A gyártási kapacitás egynegyede Kínában, egy-egy ötöde az Egyesült Államokban és Európában, 6%-a pedig Indiában lesz.
- A 2030-ig tervezett bővítési helyszínek 20%-át azonban nem közölték, ami azt jelenti, hogy a földrajzi eloszlás változhat a helyi kereslet és a helyi gazdasági ösztönzők hatására.
- 2030-ra a PEM-gyártási kapacitás a globális kapacitás közel egynegyedére nőhet, miközben az alkáli elektrolízisek aránya csökken**, bár még mindig meghatározó, 54%-os lesz.
- A bejelentett gyártókapacitásnak mindössze 8%-a érte el az FID fázist vagy van építés alatt.
- Az összes bejelentett gyártási kapacitás mintegy 30%-a a már meglévő üzemek bővítése, vagy a későbbiekben épülő, konkrét célév nélkül bejelentett új gyártóüzemek bővítése.
- Mivel a meglévő üzemek tervezett bővítései gyakran rövidebb átfutási idővel rendelkeznek, mint egy újonnan épülő üzem építése, a vállalatoknak több időt hagynak arra, hogy a kereslet jövőbeli alakulása alapján döntsenek e tervek megvalósításáról. Ez további bizonytalanságot jelent azzal kapcsolatban, hogy a bejelentett bővítések végül megvalósulnak-e.

A bejelentett gyártási kapacitások mérete elegendő a 2030-ra bejelentett elektrolizáló projektek ellátására

A globálisan bejelentett kumulatív telepített elektrolizáló kapacitás és gyártói kibocsátás (termelés) 2025 és 2030-ban



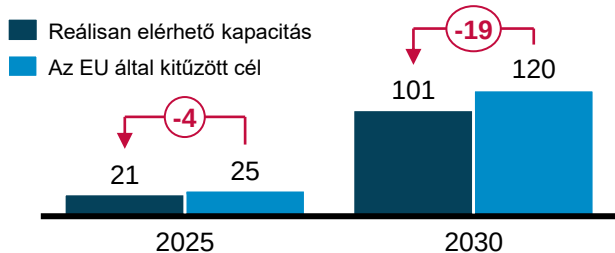
Megjegyzés: A gyártási output 85%-os gyártási kapacitás kihasználtságot feltételez.

Megállapítások

- Ha a gyártók valamennyi bejelentése időben és a vállalt méretben megvalósul, akkor az elektrolizálógyártó létesítmények potenciális teljesítménye elegendő lenne ahhoz, hogy **2030-ig valamennyi bejelentett projektet megvalósíthassanak**
- Ha csak a bejelentett, FID-t elért vagy építés alatt álló (azaz lekötött) kapacitásokat vesszük figyelembe, akkor a potenciális kibocsátás nem csak az FID-t elért gyártási projektek kielégítésére lenne elegendő, hanem 2030-ra a jelenleg megvalósíthatósági vizsgálat alatt álló gyártási projektek elektrolizáló keresletét is fedezni tudná.
- A lekötött H2 projektek és a gyártási kapacitás közötti egyensúlytalanság azonban azt jelentheti, hogy ha a 2030-ra vonatkozó, jelenleg megvalósíthatósági tanulmány szakaszában lévő H2 projektek a tervezettnél lassabban haladnak, ez 2030-ban az elkötelezett gyártási kapacitások alacsony kihasználtságát eredményezheti.

Habár a bejelentések alapján globálisan elegendő elektrolizáló gyártási kapacitás áll rendelkezésre, Európa némileg elmarad a kitűzött céloktól

A reálisan elérhető gyártási kapacitás és az EU által korábban kijelölt célok (GW)



- Az EU számítása szerint **2025-ig 21 GW** elektrolizáló gyártási kapacitást tudnak biztosítani az érdekelt vállalatok. Az iparág a törekvések ellenére **4 GW-tal elmarad** a korábban **kitűzött 25 GW-os céltől** szabályozási és finanszírozási nehézségek miatt.
- Az EU már kijelentette, hogy a **RePowerEU** legalább **120 GW** elektrolízis-kapacitást **igényel 2030-ig**, amihez körülbelül **25 GW gyártási kapacításra lenne szükség 2025-től**.
- Az iparág bővítési tervei alapján a gyártók a következő három évben **88%-os éves növekedési rátát** prognosztizálnak.

A fejlesztési kapacitást lassító három fő problématerület:

1

Szabályozási problémák



- Szigorú szabályozások** az EU részéről. Hiányok vannak a szabályozói keretrendszerben és a végrehajtás sebességében, ami **visszatartja a jövőbeli hidrogén termelőket és felhasználókat a kötelezettségvállalásoktól**.

2

Ellátási lánc problémák



- Az EU elvárása, hogy az **elektrolizálók 40%-át európai gyártóktól** szerezzék be (EU-nak kb. 30%-a van az összes globális elektrolizáló gyártási kapacitásból, és jelenleg szinte minden gépet a hazai piacon szállít).
- Kihívások** vannak az **integrált ellátási láncok kiépítésével**, valamint az **alkatrészek és nyersanyagok rendelkezésre állásával** a szükséges méretben (kritikus fémek, alapvető vegyületek és prémium minőségű szerves anyagok, mint például fluoropolimerek).

3

Finanszírozási problémák



- Jelentős különbség van az Európában kijelölt feladatok és az erre a magánszektor befektetés vonzásához szükséges források között, **nem egyenlő mértékű pénzügyi támogatás a zöld hidrogén terén a fő globális piacokon**, ami eltereli a befektetői érdeklődést Európától.
- A központi támogatás szükségessége mellett **az állami finanszírozási intézmények, mint az EIB, segíthetnek** a kockázatok csökkentésében és a méretgazdaságosság elősegítésében, nyújtva hitelezési garanciákat a gyártóknak.

Az elektrolizáló gyártók 2021 óta először csökkentették gyártási kapacitási terveiket, aminek okaként a szilárd elköteleződés hiányát és politikai akadályokat jelöltek meg

2023

- 2023-ra a **gyártási kapacitás várhatóan 19%-kal csökken** az eredeti tervekhez képest.
- A zöld hidrogén projektek késleltetése és a biztos megrendelések hiánya miatt a **gyártók kénytelenek voltak korrigálni a kapacitásukat**.
- Ettől függetlenül 2023-ban a gyártási **kapacitás várhatóan ~19 GW-ra nő**, ami 35%-os növekedést jelent az előző évhez képest.

2024

- A tervezett kapacitás 2024-re várhatóan ismét **csökken** az eredeti tervekhez képest.
- Az elektrolizáló gyártók továbbra is tervezik kapacitásuk növelését, de lassabb ütemben, az összes elektrolizáló **gyártási képességük 57%-kal emelkedik majd, és eléri a 52,6 GW-ot** a következő év végére.

- Az elektrolizáló gyártók **először csökkentik gyártási kapacitásuk bővítési terveit 2021 óta**.
- **Az alapvető ok továbbra is a zöld hidrogén projektek késése**, amelyek Európában és az Egyesült Államokban a **politikai akadályok miatt**, Kínában pedig a **gyengébb kereslet miatt** akadoznak, ennek hatására a gyártók, különösen az európai és az amerikai vállalatok, **visszavették ambícióikat** a következő két évre.
- A kínai piacon az **elektrolizálók iránti kereslet jelentősen csökkent**, ami befolyásolta a gyártókat is. **Kína 2023-ban csak 1,3 GW kapacitásnyi elektrolizáló tervez gyártani**, emiatt a kisebb kínai vállalatok csődvészély előtt állnak.

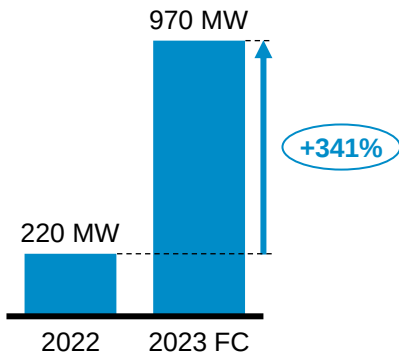
Az előrehaladás különböző kontinenseken oszlik meg, 2023 elejéig Kína számított piacvezetőnek, de a nyugati országok egyre dominánsabb szereplőkké lépnek elő

A zöldhidrogén-gazdaságban jelentős előrelépést tett országok és régiók

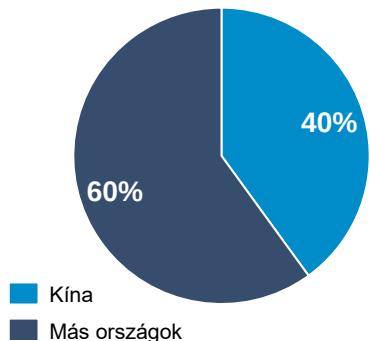
Kína



A telepített elektrolizáló kumulált kapacitása



Az elektrolizáló berendezések globális gyártási részesedése



Egyesült Államok

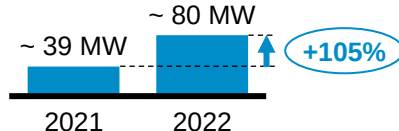


- Az Egyesült Államok 2022-ben az **inflációcsökkentő törvény (IRA)** keretében jelentős ösztönzőket jelentett be, többek között a **gyártási projektek finanszírozására szolgáló hitelt**.
- Az IRA rendelkezései révén **egyre több bejelentés** érkezik az országban új **elektrolizáló berendezéseket gyártó létesítményekre** vonatkozóan.

Európai Unió



Az elektrolizáló berendezések telepítésének összessége



- A Bizottság egy **5,4 milliárd eurós finanszírozást hagyott jóvá** az első hidrogénnel kapcsolatos, Közös Európai Érdekű Fontos Projekt (IPCEI), a **Hy2Tech támogatására**

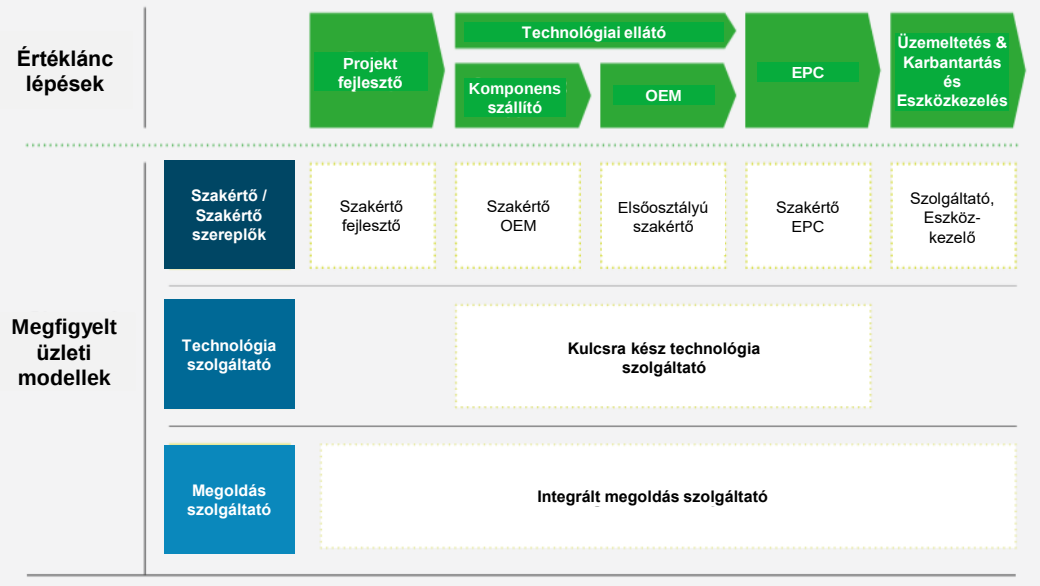
Megállapítások



- Az alkáli, PEM és egyéb elektrolizáló technológiák részesedése viszonylag stabil volt az elmúlt két évben, **az alkáli elektrolízis technológia körülbelül 60%-ot tesz ki, míg a PEM technológia körülbelül 30%-ot. Kínában**, a legnagyobb piacon, az elhelyezett elektrolizáló kapacitás nagy része **alkáli technológiával** rendelkezik, míg az **PEM technológia részesedése magasabb Európában és Észak-Amerikában**.
- 2023-ig Kína vezető szerepe megkérdőjelezhetetlen volt a zöldhidrogén piacon, azonban a nyugati országok ambiciózus törekvései láthatóan átforgatják a piaci viszonyokat.

A zöldhidrogénprojektek sikeréhez több különböző piaci szereplő összehangolt munkája szükséges, amihez még mindig keresik a megfelelő üzleti modellt

A zöldhidrogén-előállítási projektek során leggyakrabban használt üzleti modellek



A zöldhidrogénprojektek különböző **piaci szereplők összehangolt együttműködését igénylik** az életciklus teljes folyamatában. A projektfejlesztéstől az üzemeltetésig **számos szerepet töltenek** be a sikeres zöldhidrogénelőállításban.



A zöldhidrogén előállításának 70%–80%-át kitevő **megújuló energiához való hozzáférés kulcsfontosságú tényező** a projekt fenntartható gazdaságosságához és környezetbarát jellegéhez.



Az offtakerek (felhasználók) előzetes biztosítása elengedhetetlen a zöldhidrogénprojektek sikeres finanszírozásához, mivel ez csökkenti a beruházások kockázatát és növeli a projekt vonzerejét a befektetők számára.



A zöldhidrogénipar még mindig **keresi az optimális üzleti modelleket**, és a szereplők gyakran **konzorciumokban vesznek részt** a kockázatmegosztás és tapasztalatszerzés céljából. Ahogy a piac fejlődik, a vállalatoknak alkalmazkodniuk kell a változó körülményekhez, hogy maximalizálják a nyereségüket.

A kormányok jelentősen emelték a hidrogénkapacitás telepítési célokat, több kormány új támogató mechanizmusokat vezetett be

Irányelvek és szabályozások



- A kormányok jelentősen **emelték a hidrogénkapacitás telepítési célokat**.
- A nemzeti elektrolízis kapacitás telepítésére vonatkozó összes kormányzati célkitűzés összege körülbelül **160-210 GW-ra emelkedett**, ami 10%-os növekedést jelent a 2022-es évhez képest.
- Több kormány **új támogató mechanizmusokat vezetett be a projektfejlesztők támogatására** és a beruházási kockázatok csökkentésére, mint például adományok, kölcsönök, adókedvezmények és szénkontraktusok (CCfDs).



Egyesült Államok

2021-ben elfogadásra került a **Bipartisan Infrastructure Law**, amely **támogatást nyújt hidrogén központok létrehozásához** és ösztönzőket biztosít az infrastruktúra és elektrolízis gyártás előmozdításához. Az **IRA**, amit **2022-ben** írtak alá, **adókedvezményeket és támogatást kínál a hidrogén technológiákhoz**, ami hatással lehet az elektrolízis telepítésére és gyártó létesítményekre.



Európai Unió

2022 júliusában az **Európai Bizottság jóváhagyta 5,4 milliárd euró támogatást** az első hidrogénprojektekre (IPCEI). 2023 februárjában **elfogadták a Delegált Rendeletet, ami meghatározza a hidrogén termelésének kritériumait**, és márciusban elindult az **EU Hidrogén Bank a green premium támogatására**. Az első árverés várhatóan 2023 harmadik negyedévében lesz.



Németország

2021-ben Németország elindította a **H2Global programot**, amely a CCfD megközelítéshez hasonló mechanizmust alkalmaz, és **a keresleti és kínálati árak közötti különbséget a német kormány által nyújtott támogatással kompenzálja**. A pályázati eljárás 2022 decemberében indult, a szállítások 2024 végére várhatóak, bár a közelmúltban meghosszabbították a pályázati határidőket.



Egyesült Királyság

2021-ben az Egyesült Királyság a **CCfD-khez hasonló megközelítésen alapuló, alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogénre vonatkozó üzleti modellt terjesztett elő**. A kormány 2022 július és 2023 januárja között **megnyitotta az első elektrolitikus allokációs fordulót, és előválogatta a projekteket, amelynek célja legalább 250 MW kapacitás támogatása volt**. A második allokációs forduló 2023 végére nyílik meg.

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

Zöldhidrogén előállításának költségstruktúrája - CAPEX és OPEX

Operatív költségek (OPEX)

Fix költségek

Üzemeltetés

Karbantartás

Közvetlen munkaerő

Közvetlen költségek

Adók

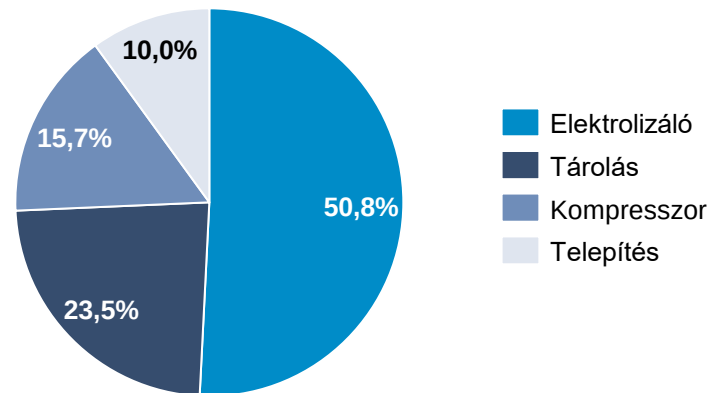
Időszakos cella csere

Változó költségek

Energia költségek

Vízellátás

A beruházási költségek (CAPEX)

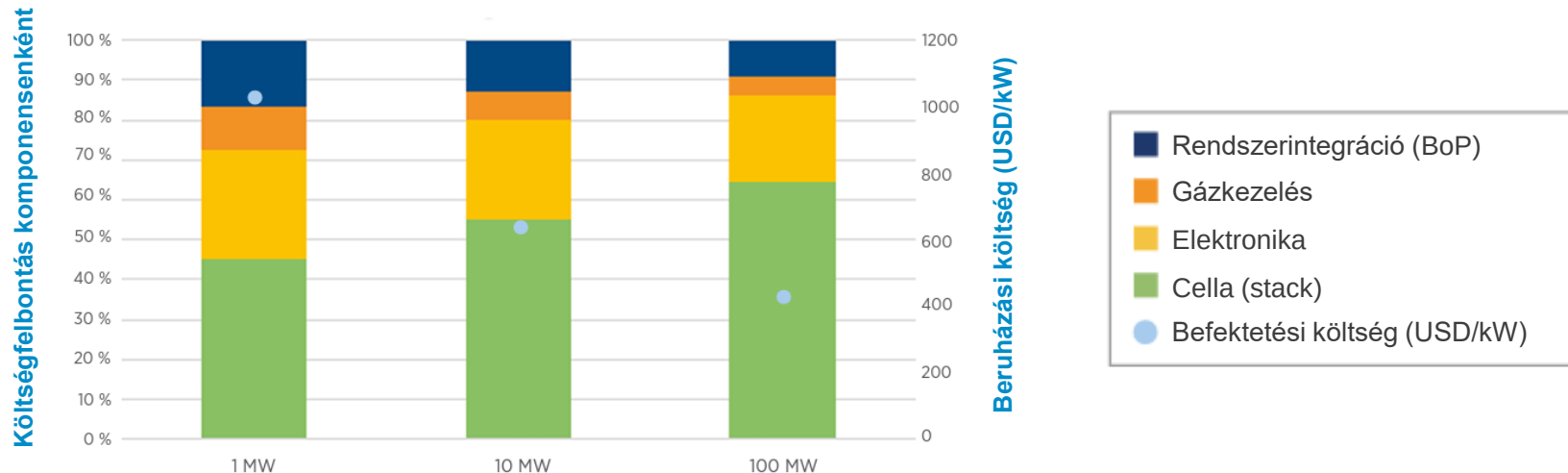


Megállapítások

- A **CAPEX** költségek **50%-át az elektrolizáló egység beszerzése generálja**, ezen felül jelentős kiadásokat hordoz a **tárolás kialakítása (23,5%)**.
- Az **OPEX** költségek feloszthatóak **Fix és Változó költségekre**. A **fix OPEX**, amely az **üzemeltetési, karbantartási** költségeken túl a közvetlen **munkaerő költségét, overhead költségeket és adókat tartalmazza**. Ez általában a közvetlen **CAPEX 2%-4%-ára** (7-11 év közötti periódusban történő időszakos cellacsere nélkül) tehető.
- A **változó költségek** főként az **áramvásárlási költségekből** és kisebb mértékben **tisztított víz költségeiből** állnak. Ezért az árambeszerzés kulcsfontosságú az üzleti megvalósíthatóság tekintetében.

Az elektrolizálók esetében a fő költséget a cella jelenti a teljes költség közel 50%-ával

Költségfelbontás fő komponensenként a jelenlegi árak alapján az alkáli elektrolizálóknál

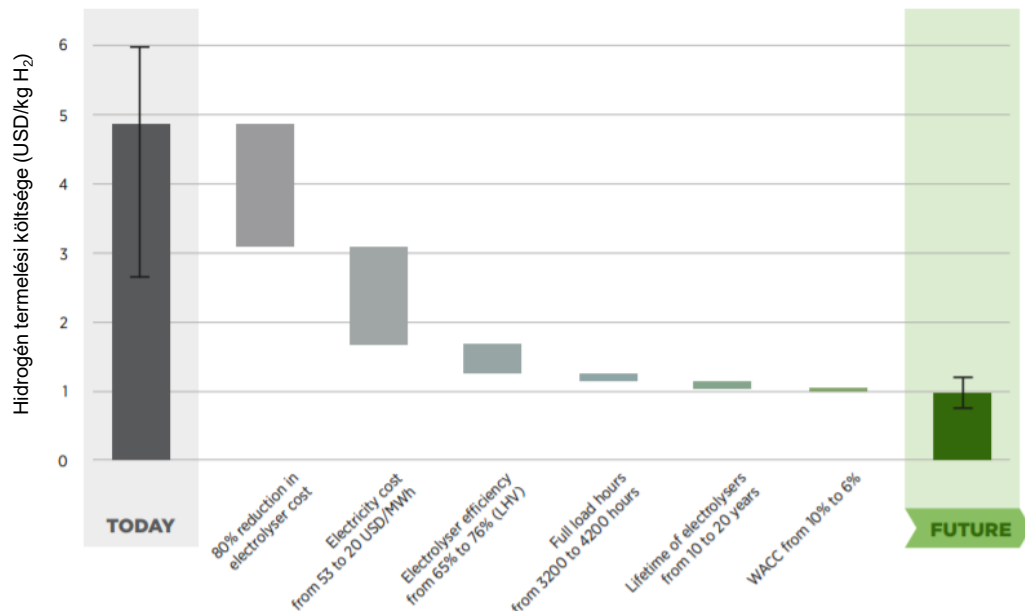


- Az alkáli elektrolizálók esetében **a fő költségkomponenst a cella jelenti**, ami 1 MW-os kapacitású elektrolizáló esetében az **összköltség közel ~50%-át teszi ki** (100 MW kapacitású elektrolizáló esetén 60%-fölött).
- További jelentős költségvonzzal bír az **elektronika**, ami megközelítőleg az **összköltség ~15%-át** teszi ki. **A gázkezelés** és a **rendszerintegráció** együttesen a **költségek ~22%-át** teszik ki.
- A beruházási **méret növekedésével a beruházási költség csökken**.

A zöld hidrogén akkor lesz versenyképes, ha jelentősen csökken az elektrolizálók és a villamos energia ára

MITŐL LESZ VERSENYKÉPES A ZÖLD HIDROGÉN?

A zöld hidrogén versenyképességre ható tényezők



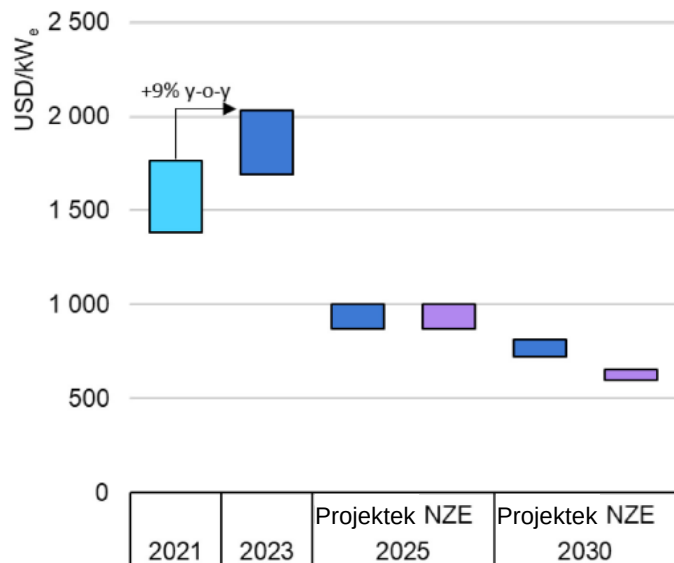
- A zöld hidrogén árának drasztikus csökkenését a szakértők alapvetően két tényezőtől várják: **Elektrolizálók költségének csökkenése** és a **hidrogénelőállításához használt villamosenergia költségének** csökkenése.
- Az elektrolizálók gyártási költségének akár 80%-os csökkenése is megvalósulhat az IRENA szerint.
- Ezen felül jelentősen javíthatja a zöld hidrogén versenyképességét a villamos energia költségeinek jelentős (több, mint 50%-os) csökkenése.
- Az **elektrolizáló technológia fejlődése** is képes közvetlenül a hidrogén előállítási árát csökkenteni.
- Magasabb hatásfok elérése: 65% → 76%
- Elektrolizálók kihasználtságnak javulása: 3200 → 4200 óra/év
- Élettartam növekedése: 10 → 20 év

Megjegyzés: A bemutatott diagram a következő feltételezésekkel él: 130-770 USD / kW befektetési költség, 65-76%-os hatékonyság (LHV), 20-53 USD / MWh villamosenergia ár, 3.200-4.200 órás kihasználtság (onshore szél), 6-10%-os WACC.

Forrás: IRENA, 2020

Az elektrolizálók költsége hosszútávon jelentősen csökken, azonban 2021-ről 2023-ra 9%-os növekedést tapasztalt az iparág

Elektrolizálók tőke költségeinek alakulása a projekt pipeline és a 2050-ig terjedő nettó nullkibocsátásos forgatókönyv alapján, 2025 és 2030-re



NZE – Net Zero Emission scenario (Nullkibocsátást célzó forgatókönyv)

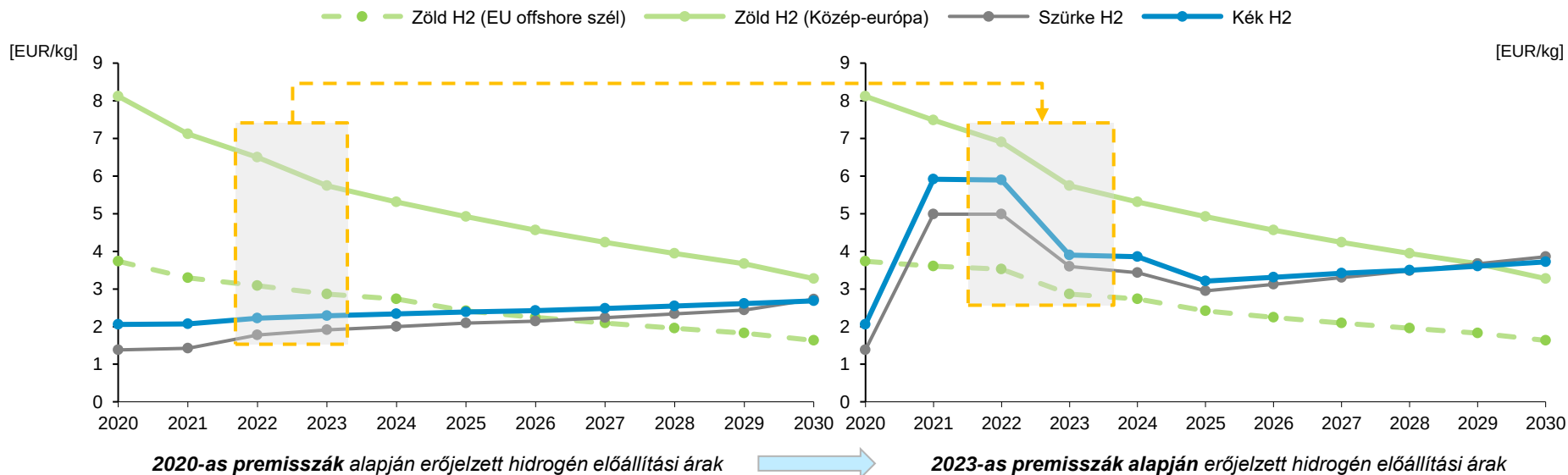
Megállapítások



- Az elektrolizálók telepítési költsége az elmúlt években jelentősen megnőtt az anyag- és munkaerőköltségek emelkedése miatt. Egy telepített elektrolizáló beruházásigénye (beleértve a berendezéseket, a gázkezelést, rendszerintegrációt, valamint a mérnöki, beszerzési és kivitelezési költségeket) **1 700 USD/kW és 2 000 USD/kW** között mozog (AEL és PEM esetében), ami a 2021-ben megfigyelt tőkeköltség-tartományhoz képest éves szinten mintegy 9%-os növekedést jelent. Európában egyes projektfejlesztők még ennél is magasabb, egyes esetekben akár 40%-os inflációs értékeket figyeltek meg.
- A Kínában gyártott alkáli elektrolizálók CAPEX tekintetében sokkal olcsóbbak, mint az Európában vagy Észak-Amerikában gyártottak: **egy telepített elektrolizáló esetében 750 – 1300 USD/kW** körül mozognak, de egyes források szerint akár 350 USD/kW is lehet. **A költség szám a kínai műszaki szabványokat és feltételeket tükrözi.** Export esetében a kínai elektrolizálóknak a más országok szabványainak való megfelelés érdekében történő kiigazítása magasabb költségeket eredményezhet.
- Az elektrolizálók CAPEX-költségének inflációja a hidrogén előállítás önköltségében (LCOH) **20%-os költségnövekedést jelenthet** (feltételezve, hogy minden más paraméter változatlan marad), mivel ma a CAPEX jelenti a fő költségtényezőt a hidrogén árában. A közelmúltbeli infláció és a munkaerőköltségek növekedése jelentős hatással volt a fejlesztés alatt álló projektekre, amelyek első költségbecsléseit több esetben felfelé módosították (pl. NEOM vagy Bad Lauchstädt Energy Park).
- A jelenlegi bejelentésekben előirányzott, a következő évtizedre tervezett elektrolizáló kapacitásfelfutás alapján **a tőkeköltség a méretgazdaságosság és a tömegtermelés miatt csökkenhet.** A bejelentett projektek kapacitásnövelése miatt az elektrolizálók költsége 2023-hoz képest 2025-re 50%-kal, 2030-ra pedig 60%-kal csökkenhet, és 720-810 USD/kW-ra tehető.
- A felvázolt költségcsökkenés mögött a következő premisszák vannak: 18%-os tanulási ráta az elektrolizáló cellára, 5-12% közötti tanulási ráta a többi komponensre és rendszerintegrációra.

A fosszilis alapon előállított szürke és kék hidrogén árában jelentős növekedés történt az energiaválság ideje alatt

Hidrogén előállítás önköltsége 2020-as premisszák alapján és a megváltozott piaci körülmények szerint 2022 tavaszán*



- A rendkívül **magas földgáz, villamosenergia és szén-dioxid kvóta ár miatt**, a **szürke** és **kék hidrogén** előállítási ára az energiaválság legnehezebb időszakában a számításaink szerint **a zöld hidrogén előállítási árát is megközelítette**. Ez a zöld hidrogén projektek piaci megtérülését, attraktivitását növeli, valamint **nyomást helyez** a jelenlegi hidrogén előállítókra és felhasználókra, **hogy minél hamarabb váltsanak a tiszta technológiák irányába**.
- Az enyhülő energiaválság következtében a szürke és kék hidrogén ára ismét csökken és a válságot megelőző szinthez kezd közelíteni, ám annál egy magasabb szinten konszolidálódik.**

Hidrogéntermelési költségek változása a beruházási költség és energia költség függvényében

Érzékenységvizsgálat a villamosenergia-költség és az elektrolizáló CAPEX mentén

Alkáli (1 MW)						PEM (1 MW)							
Elektrolizáló beruházási költsége – CAPEX (\$/kW)						Elektrolizáló beruházási költsége – CAPEX (\$/kW)							
Energia költség (\$/MWh)	\$/kg	\$1,180	\$1,310	\$1,460	\$1,610	\$1,770	Energia költség (\$/MWh)	\$/kg	\$1,420	\$1,580	\$1,760	\$1,940	\$2,130
	\$20	\$2.70	\$2.81	\$2.93	\$3.05	\$3.18		\$20	\$3.46	\$3.61	\$3.78	\$3.94	\$4.12
	\$30	\$3.44	\$3.54	\$3.67	\$3.79	\$3.92		\$30	\$4.31	\$4.46	\$4.62	\$4.79	\$4.97
	\$40	\$4.18	\$4.28	\$4.41	\$4.53	\$4.66		\$40	\$5.16	\$5.30	\$5.47	\$5.64	\$5.82
	\$50	\$4.92	\$5.02	\$5.15	\$5.27	\$5.40		\$50	\$6.00	\$6.15	\$6.32	\$6.49	\$6.67
	\$60	\$5.66	\$5.76	\$5.89	\$6.01	\$6.14		\$60	\$6.85	\$7.00	\$7.17	\$7.34	\$7.51

* Az érzékenység azzal számol, hogy az elektrolizálók 98%-os kihasználtsággal működnek.

- Az elektrolízissel előállított **hidrogén árát két fő tényező befolyásolja: az elektrolizáló beruházási költsége és az elektrolizáló által felvett energia ára. A felvett energia árát** pedig elsődlegesen **az energiát előállító megújuló termelő eszköz beruházási igénye és kihasználtsága vezérli.**
- Jelenleg az **alkáli elektrolizáló beruházási igénye kisebb, mint a PEM-es berendezéseké, ezért az előállított hidrogén egységköltsége is alacsonyabb.**

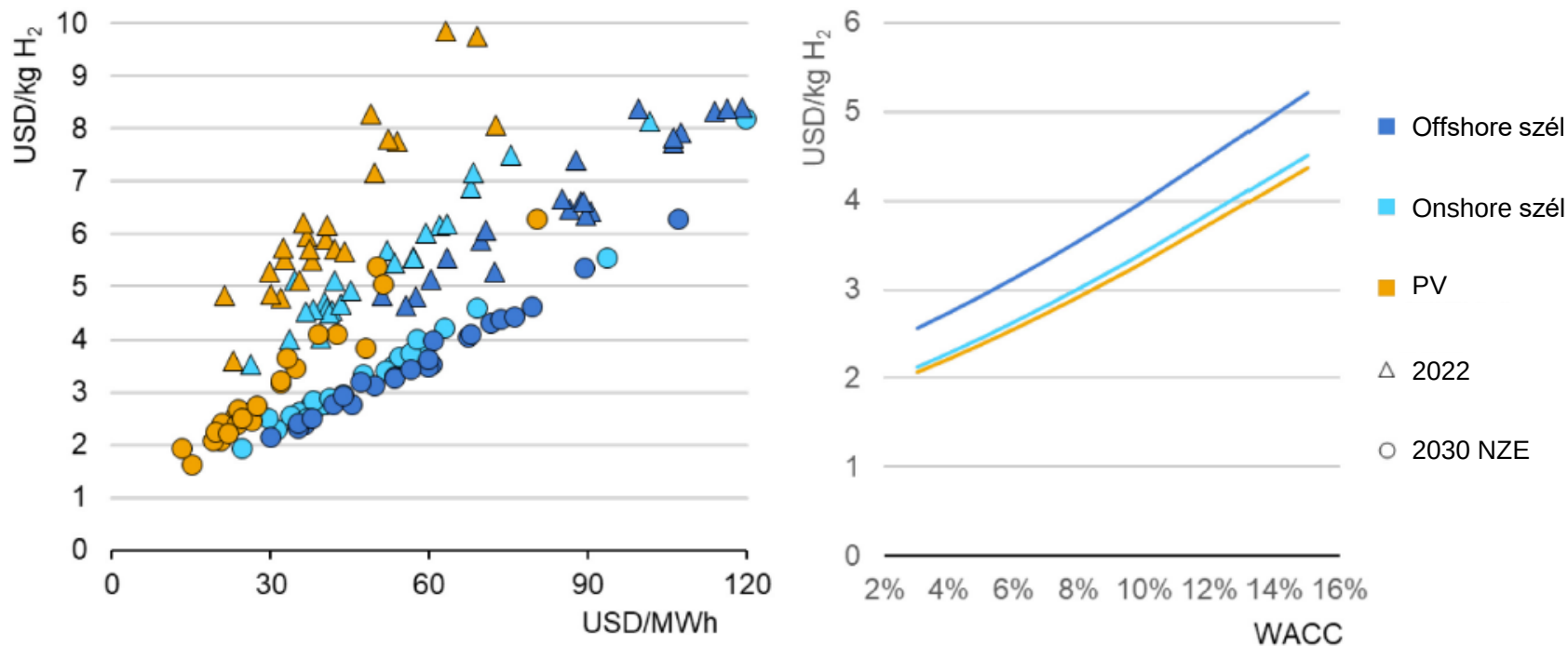
Hidrogéntermelési költségek változása a elektrolizáló kihasználtság és energia költség függvényében

Érzékenységvizsgálat a villamosenergia-költség és az elektrolizáló kihasználtság mentén													
Alkáli (1 MW)							PEM (1 MW)						
Elektrolizáló kihasználtság							Elektrolizáló kihasználtság						
Energia költség (\$/MWh)	\$/kg	90%	75%	60%	45%	30%	Energia költség (\$/MWh)	\$/kg	90%	75%	60%	45%	30%
	\$20	\$3.04	\$3.25	\$3.63	\$4.24	\$5.47		\$20	\$3.90	\$4.20	\$4.71	\$5.56	\$7.20
	\$30	\$3.78	\$3.99	\$4.37	\$4.98	\$6.21		\$30	\$4.75	\$5.05	\$5.56	\$6.41	\$8.04
	\$40	\$4.52	\$4.73	\$5.11	\$5.72	\$6.95		\$40	\$5.60	\$5.90	\$6.41	\$7.26	\$8.89
	\$50	\$5.26	\$5.47	\$5.85	\$6.46	\$7.69		\$50	\$6.45	\$6.75	\$7.25	\$8.11	\$9.74
	\$60	\$6.00	\$6.21	\$6.59	\$7.19	\$8.43		\$60	\$7.30	\$7.59	\$8.10	\$8.96	\$10.59

- További fontos hidrogén **önköltséget befolyásoló tényező az elektrolizáló kihasználtsága.**
- **Minél magasabb kihasználtsággal működik az elektrolizáló, annál olcsóbb az előállított hidrogén önköltsége. Az elektrolizáló kihasználtságát a megfelelő csatlakoztatott megújulót termelő kapacitással lehet növelni.**

Szélenergiával előállított hidrogén a magas kapacitáskihasználtság miatt, a napenergia pedig az alacsony beruházási költség miatt lehet vonzó

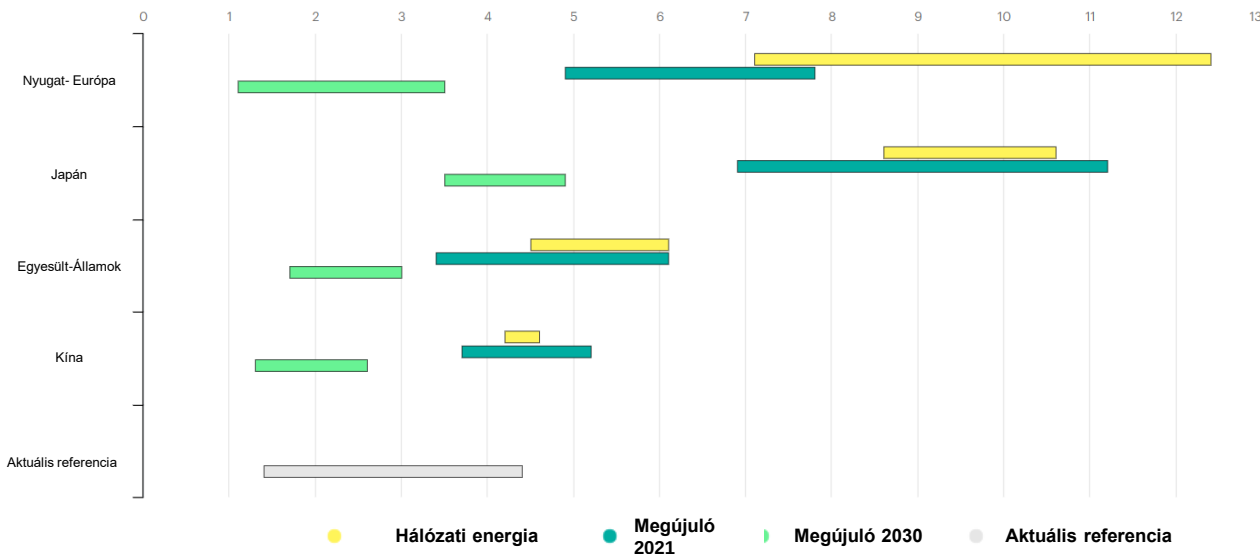
A hidrogén önköltsége (LCOH) eltérő megújulóenergia termelők esetében



Az energiaárak jelentős eltéréseket mutatnak régiónként, emiatt Európában jóval drágább lehet az alacsony kibocsátású hidrogén előállítása

Termelési költségek az elektrolízis által előállított hidrogén esetében kiválasztott régiókban a jelenlegi referenciaértékekhez képest

USD/kg



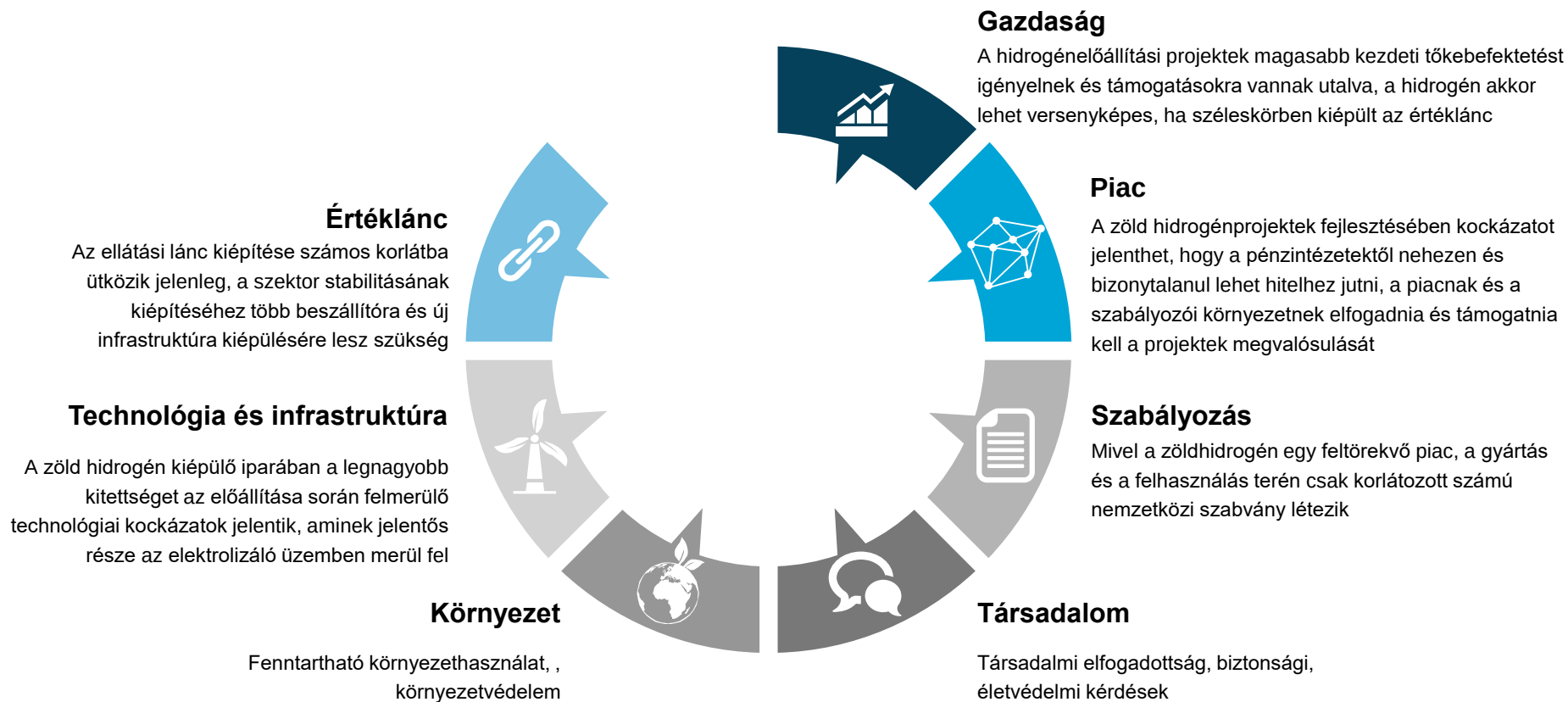
- Az **energiaárak jelentős eltéréseket mutatnak a régiók között**, ami strukturális előnyt biztosít az alacsony energia költségekkel rendelkező régiók számára.
- Az **alacsony kibocsátású hidrogén előállítása Nyugat-Európában és Japánban jóval drágább lehet**, mint Kínában vagy az Egyesült Államokban.
- Az **alacsony kibocsátású hidrogén előállítási költségei jelentősen csökkenhetnek a következő évtizedben** az elektrolízis technológiák és a megújuló energiaforrások költségcsökkenése miatt, ami versenyképessé teheti a hidrogén előállítást a hagyományos fosszilis üzemanyagokhoz képest.

- A Megújuló 2021 és 2030 költségtartomány a napelemekkel, tengeri szélörművekkel vagy szárazföldi szélörművekkel hajtott elektrolízist jelent.
- Az „Aktuális referencia” értékek fosszilis alapú előállítást mutat.

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
— Kockázatok és biztonsági szempontok	70
— Technológiai kockázatok	76
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86

Az elektrolízis során felmerülő kockázatok és biztonsági szempontok 7 fő csoportba sorolhatóak



A hidrogéngyártási projektek magasabb kezdeti tőkebefektetést igényelnek és támogatásokra vannak utalva, a hidrogén akkor lehet versenyképes, ha széleskörben kiépült az értéklánc

A "Gazdasági kockázatok" kategória összegyűjti a zöld hidrogén ellátási láncra vonatkozó gazdasági és pénzügyi kockázati tényezőket

Magas tőkebefektetés a H₂ termelési és szállítási technológiába

- Az elektrolizáló **üzemek** kifejlesztéséhez és a zöld hidrogén **tárolási és szállítási rendszerek** kiépítéséhez vagy meglévő **szállítási módok** átalakításához **magas költségek** társulnak.
- Mind gáz- mind folyékony **hidrogén tárolása** és szállítása viszonylag **költséges**, különösen a folyékony hidrogén esetében.
- A **megújuló energiák ára gyakran magasabb** a fosszilis tüzelőanyagokhoz képest az elektrolizálók üzemeltetéséhez.
- A zöld hidrogén infrastruktúra még a korai szakaszban van, és **nincsenek kiforrott méretgazdaságossági előnyök**.

Magas működési és karbantartási költségek

- A zöld hidrogén előállításához szükséges technikai berendezések **üzemeltetési és karbantartási költsége magas**.
- A zöld hidrogén **előállításának költsége jelentősen magasabb** (2,5–5,5 €/kg) a fosszilis tüzelőanyag-hidrogén termeléséhez képest (kb. 1,5 €/kg).
- A zöld hidrogén termeléshez szükséges folyamatokban **jelenleg sok kézi munkaerőt alkalmaznak**, ami hozzájárul a magas üzemeltetési és karbantartási költségekhez.

Hosszú távú pénzügyi életképesség és nyereség

- Jelenleg a zöld hidrogén **nem tekinthető versenyképesnek a helyettesítő termékekkel szemben**. A piaci kereslet és a magas termelési költségek miatt **jelentős bizonytalanság merül fel**.
- A zöld hidrogén termeléshez megújuló forrásból származó áramra van szükség, aminek versenyképes áron elérhetőnek kell lennie. Az elektrolizáló üzemekre **jelenleg ugyanazok az adók és tarifák vonatkoznak**, mint más nagy ipari fogyasztókra, ami további költséget jelent.
- Bár vannak pozitív jelek a zöld hidrogén termelési költségeinek csökkenéséről, például a megújuló energiák költségének csökkenése, az elektrolizálók alacsonyabb költségei és új technológiai fejlesztések, **a hosszú távú költségcsökkenés nem garantált**.

A zöld hidrogénprojektek fejlesztésében kockázatot jelenthet, hogy a pénzintézetektől nehezen és bizonytalanul lehet hitelhez jutni, a piacnak és a szabályozói környezetnek elfogadnia és támogatnia kell a projektek megvalósulását

A Piac kategória azon kockázati tényezőket foglalja össze, amelyek veszélyt jelentenek a zöld hidrogén globális piacfejlesztésére mind a termelők, mind a fogyasztók számára

Fogyasztói elfogadás

- A zöld hidrogén elfogadását gátolja a **környezetszennyezés** és az átmeneti **energiaár-emelkedés** problémáival kapcsolatos **aggodalom**.
- A **ösztönzők hiánya** hátráltatja a zöld hidrogén elfogadását a fogyasztók körében.
- Az ügyfelek **nem látják azonnali előnyeit** az új üzemanyagforrásra való áttérésnek, és kényelmetlenségként érzékelhetik. A zöld hidrogén az egyéb hagyományos és megújuló üzemanyagokhoz képest lehet, hogy kevésbé versenyképes áron kerül kínálatra, ami további akadályt jelent az elfogadás számára.

Fogyasztói tudatosság

- A zöld hidrogénnek olyan helyettesítő termékekkel kell versenyeznie, mint a fosszilis tüzelőanyagok, más megújuló energiák, valamint kék és szürke hidrogén. **A jelenlévő alternatívák csökkenthetik a zöld hidrogén iránti keresletet.**
- Sok ország és régió a **kék hidrogén termelését is beépítette megoldásaik részeként** a hidrogénstratégiákba, ami versenytársakat teremt a zöld hidrogén előállításának.
- A **informátlanság és tudatosság hiánya** a fenntartható energia alternatívák felé **keresletromboló hatással lehet** a zöld hidrogén iránt.
- Jelenleg **alacsony szintű értékelismerés tapasztalható** a zöld hidrogén iránt, és kevés a kereslet a zöld hidrogénnel készült termékek, például zöld acél vagy zöld ammónia iránt.

Feltételek biztosítása

- A zöld hidrogén előállítása és elfogadása során számos szabályozási kockázattal kell szembenézni, amelyek jelentősen befolyásolhatják a folyamatot.
- A kormányok **stabilitásának hiánya** és a folyamatosan felülvizsgált és **változó szabályozások** jelentős gátat jelenthetnek a zöld hidrogénre való átmenetben. Az **instabil politikai környezet** és az állandóan változó szabályozások **megnehezíthetik a hosszú távú tervezést és befektetéseket** a zöld hidrogénprojektekbe.
- A **kormányzati ösztönzők és támogatások** hiánya vagy elégtelensége ugyancsak komoly kockázatot jelenthet a zöld hidrogénipar fejlődésében.
- A különböző **kibocsátáskereskedelmi rendszerek, széndioxidadók** alkalmazása segíthet a zöld hidrogén versenyképességének növelésében.

Az ellátási lánc kiépítése számos korlátba ütközik jelenleg, a szektor stabilitásának kiépítéséhez több beszállítóra és új infrastruktúra kiépülésére lesz szükség

Ebben a kategóriában találhatóak az ellátási láncot és a zöld hidrogén előállításának irányítását érintő kockázati tényezők. Több olyan kockázati tényező van benne, amelyek kiemelten fontosak

Ellátói kudarc

- A megújuló energiaellátásban és a villamosenergia-igényben történő **fluktuáció** szállítói és keresleti oldalról is folyamatos kihívást jelent.
- A kulcsfontosságú **beszállítók kiesése komoly késedelmet eredményezhet** a kritikus anyagok szállításában.
- A zöld hidrogén előállítása során az **elektrolizálók kulcsfontosságú komponensek, melyeket beszállítóktól szereznek be**. A jelenlegi előállítási kapacitás nem elegendő ahhoz, hogy a tervezett 2050-es célokat teljesíteni lehessen, és komoly növekedésre van **szükség a gyártási kapacitás bővítésében**.
- Az elektrolizálók gyártási kapacitásának jelentős növelése elengedhetetlen a tervezett 5 TW-os elektrolizáló telepített kapacitás eléréséhez, és **bármilyen késlekedés gátolja a hidrogén előállítását**.

Technikai kivitelezhetőség nehézségei a hidrogén adottságai miatt

- **Permeáció:** Nagyobb szivárgás a kisebb hidrogénmolekulák miatt a csöveken és kötéseken.
- **Ridegedés:** Az acél és hidrogén reakciói törékennyé tehetik a fémeket, károsítva az alkatrészeket.
- **Hidrogénnel támogatott fáradás:** Gyakori nyomásingadozások csökkenthetik a ciklikus feszültségküszöböt, gyorsítva a csövekben lévő repedések kialakulását, és meglévő hibákból eredő repedésnövekedést okozhatnak.
- **Szénszálak hólyagosodása és károsodása:** Magas hőmérsékleten használt szelepek esetében szénszálakat alkalmaznak a nyomás levezetésére. Némelyik szál hólyagosodhat és károsodhat hidrogén jelenlétében.
- **Tüzek és robbanások:** Kis mennyiségű levegővel keveredve a hidrogén könnyen meggyullad, magas nyomáson sugárszerű tüzet okozva. Késleltetett gyulladás esetén zárt helyiségben nagy robbanás is előfordulhat.

Kritikus nyersanyagok problémái

- Az EU célkitűzése, hogy bizonyos hidrogén technológiákhoz használt fémek esetében a nyersanyagimport diverzifikációját 65%-ra növelje. Ez kihívást jelenthet, mivel **bizonyos fémeket csak néhány importőr ország szolgáltat**.
- Néhány kritikus anyagnál, például a fluoropolimereknél, **szabályozási bizonytalanságok gátolják a kapacitásbővítést**, ami akadályozza a hidrogén technológiai gyártás növekedését Európában.
- Az orosz-ukrán háború miatt **több nyersanyag ellátási lánc veszélybe került**. Oroszországban olyan fontos nyersanyagokat bányásznak, amelyek nélkülözhetetlenek az elektrolizálók számára, például nikkel, platina, irídium, palládium és szkandium. Mivel a kritikus nyersanyagok kitermelése hosszú időt vehet igénybe, **az egyoldalú függés elkerülése rendkívül nehéz**.

A hidrogén tulajdonságai az előállítás típusától, működési paraméterektől és a gáz tárolására és szállítására használt anyagtípustól függően számos kockázatot jelentenek az értékláncban

–Zöldhidrogén értéklánc



Megújuló energia kitermelése

Hidrogén elektrolízis

Szállítás és tárolás

Disztribúció és felhasználás

Felmerülő problémák

- **Zavar vagy hiba** a megújuló energiaforrásokból származó villamos **energia szállításában**
- Előállításának jellege **kompromittálja a hidrogén ellátási lánc stabil fenntarthatóságát**
- Előállítás helyszíne eltérhet a hidrogén elektrolízis lokációjától, ez esetben a **nemzetközi kapcsolatok további kitettséget jelentenek**

- Infrastruktúrával kapcsolatos kockázatok (gépek, építmények): a kulcsfontosságú alkatrészeknek csak **korlátozott számú beszállítója** van
- Tapasztalat hiánya
- **Kapacitástervezés kitétsége**
- **Technológiai kockázatok** (tűz és robbanás, biztonságtechnikai kockázatok)
- Környezeti felelősség (vízhasználat és –szennyezés)

- Szállítóvezeték meghibásodása
- **Tűz- és robbanásveszély**
- **Szivárgás**: megfelelő érzékelők nélkül nehéz azonosítani a szivárgásokat, mivel a hidrogén színtelen és szagtalan
- Más gázokkal való **bekeverés arányának felborulása**
- Tárolási kockázatok (szennyeződések, magas nyomás)

- Nem megfelelő kezelésből eredő károk
- Tűz és robbanás szivárgás miatt
- **Felhasználó oldali élet- és vagyonkár** (pl.: zárt környezetben a hidrogénszivárgás fulladást okozhat)

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
– Kockázatok és biztonsági szempontok	70
– Technológiai kockázatok	76
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	90

A zöld hidrogén kiépülő iparában a legnagyobb kitettséget az előállítása során felmerülő technológiai kockázatok jelentik, aminek jelentős része az elektrolizálóban merül fel

1

Elektrolízis hatékonysága és stabilitása

- A hidrogén előállítás elektrolitikus módszerének hatékonysága és stabilitása komoly kutatási irány.
- Az elektrolízis rendszerek hatékonyságának optimalizálása és a hosszú távú stabilitás fenntartása alapvető a megbízható hidrogén gyártáshoz.

2

Katalizátorok teljesítménye

- A hatékony katalizátorok szerepe kulcsfontosságú a víz elektrolízisében alapuló hidrogén előállításban.
- Az optimális katalitikus rendszerek kiemelt figyelmet érdemelnek, mivel hatással vannak a folyamat hatékonyságára és az energiaveszteségek minimalizálására.

3

Elektrolizálók karbantarthatósága

- Az elektrolizálók hosszú távú működésének és karbantarthatóságának biztosítása alapvető fontosságú.
- A berendezések megbízhatóságának megőrzése és a rendszerhibák minimalizálása technológiai kihívást hordoz.

4

Skálázhatóság és termelési méret

- A hidrogén előállításának skálázhatósága és a termelési méret növelése a fokozódó igényekre való válaszként fontos kérdések.
- A technológiai infrastruktúrának alkalmazkodnia kell az előállítás bővítéséhez, ezért a skálázhatóság kihívást jelenthet.

5

Vízfelhasználás és melléktermékek

- Az elektrolitikus hidrogén előállítás jelentős vízfelhasználással és melléktermék képződéssel járhat.
- A vízhatékony folyamatok kifejlesztése és a melléktermékek kezelése fontos lépés a környezetvédelem és a fenntarthatóság irányába.

6

Biztonságtechnikai kockázatok

- A hidrogén természete komplikálja az iparág elterjedését, mivel nem megfelelő kezelése súlyos következményekkel jár. Minden esetben elsődleges kell legyen az emberek és a környezet biztonsága. A biztosítók és finanszírozók támogatásához ez elengedhetetlen feltétel.

Az elektrolizálók teljesítménye nagyban függ a használt technológia típusától és az alkatrészek minőségétől, így rendkívül intenzív K+F folyamatok zajlanak a háttérben, amik kihathatnak a piaci dinamizmusokra

Elektrolízis hatékonysága és stabilitása

1 Technológiák hatékonysága, azok közti eltérés



- A jelenlegi technológiával, 40-60 kilowattóra energiára van szükség egy kilogramm hidrogén előállításához. A különböző technológiák hatékonysága nagyban függ az elektródok anyagától és az elektrolitok anyagától. Ezeknek a fejlesztése a hatékonyság növekedését eredményezheti a jövőben.
- A korrozív közeg (PEM) és a magas hőmérséklet (SOEC) a technológia stabilitásának romlását eredményezni. Emellett, a környezetvédelmi és energiahatékonysági kérdéseket vet fel. Az alacsony TRL-el rendelkező technológiák fejlesztése ezen sebezhető pontok kikerülését segítheti.

2 Gyors technológiai fejlődés és bizonytalanság a H₂-termelésben



- Ahogy növekszik a zöld hidrogén iránti kereslet, egyre inkább szükség van a megújuló energia termelő eszközöknek és elektrolizáló kapacitásának gyors bővítésére.
- Szükség van az elektrolizáló tervezésének, anyagainak, hatékonyságnak, rugalmasságnak és tartósságnak a területén történő innovációra. Azonban az innováció bizonytalanságot és változékonyságot is hozhat az elektrolizálók teljesítményében és megbízhatóságában.
- A fejlesztési verseny a piacon a nem kiforrott technológiák elterjedését jelentheti, amelyek befolyásolhatják az elektrolizáló projektek nyereségességét és életképességét

3 Technológiák kockázat



- A hidrogén és az oxigén rendkívül gyúlékony és robbanásveszélyes gázok külön-külön és együtt is. Ha szivárgás, szikra vagy hiba keletkezik rendszerben, fennáll a tűz- vagy robbanásveszély, amely kárt okozhat, valamint sérüléseket vagy haláleseteket.
- Elektrolizáló nagyfeszültségű áram hatására bontja a vizet amely meghibásodás esetén károkat vagy személyi sérülést okozhat.
- Bizonyos elektrolizáló technológiákhoz (Alkáli, AEM) magas koncentrációjú lúgos elektrolit oldattal dolgoznak amely veszélyes hulladéknak számít, illetve meghibásodás esetén károkat vagy személyi sérülést okozhat
- SOEC típusú elektrolizálók esetén, a magas hőmérsékleten történő elektrolízis, munkavédelmi kockázatot jelent.

Az elektrolizálók különféle technológiáihoz különböző típusú katalizátorokat használnak

Katalizátorok teljesítménye

1 A PEM-es elektrolízishez szükséges irídium ellátás



- PEM technológia használatakor az anód oldali oxigén fejlesztésnél irídium alapú katalizátorok a jellemzőek. Ugyanakkor az irídium nagyon ritka és drága, így a skálázhatóságban egy kockázati tényező a megfelelő mennyiségű irídium előállítása és hasznosítása.
- Ezért az irídium alapú katalizátorok fejlesztése vagy annak kiváltása nagy hangsúlyt kap a kutatások során.

2 Nikkel alapú katalizátorok aktivitása



- A nikkel alapú katalizátorok mérsékelt aktivitással vesznek részt mind az anód mind a katód reakciókban az alkáli elektrolízis során.
- A nikkel azonban korróziót és szennyeződések által okozott mérgezést is szenvedhet, ezért a tartósságának és szelektivitásának növelése fontos kihívás.

3 Átmeneti fém szulfidok



- Az átmeneti fém szulfidok olyan anyagok, amelyek a platina alternatívjaként vagy kiegészítéseként nagy aktivitással és stabilitással rendelkeznek a hidrogén fejlődési reakciók számára, különösen savas közegben.
- Azonban alacsony vezetőképességgel és gyenge diszperzióval is rendelkezhetnek, ezért szintézisük és integrációjuk javítása fontos kihívás.

Az elektrolizáló élettartalma akár egy évtized is lehet, azonban fontos az elhasználódó elemek szakszerű üzemeltetése és karbantartása

Elektrolizálók karbantarthatósága

1 A berendezések élettartalma



- Az **elektrolizáló élettartalma** függ az elektrolizáló típusától, az elektrolit minőségétől, az áramerősségtől, a feszültségtől, a nyomástól, a hőmérséklettől, a karbantartástól és a használati időtől. Általánosságban elmondható, hogy az elektrolizálók élettartama évtized is lehet, ha megfelelően üzemeltetik és karbantartják őket
- **Az elektrolit minősége:** a felhasznált víz minősége erősen befolyásoló tényező ezért Víztisztító berendezés használata szükséges.
- **Áramerősség és feszültség:** A magas áramerősség és feszültség növeli a hidrogén termelését, de egyben növeli is az energia veszteséget és a hőtermelést. A túlmelegedés károsíthatja az elektrolizálót, ezért megfelelő hűtésre és túlmelegedés-védelmi berendezésekre van szükség.

2 Az elektrolizálók karbantarthatóság



- **Elektródák anyagminősége:** a hosszantartó használat az elektródák degradációját eredményezi, ami meghibásodást és teljesítményromlást okoz. Az elektródák folyamatos monitorozás és cseréje a karbantartás egyik fő feladata.
- **Elektrolit oldat:** Elektrolizáló technológiától függően az elektrolizáló egységben szilárd vagy folyékony elektrolit található amelyet pótolni vagy cserélni kell a használat függvényében
- **Az elektrolizáló tisztítása:** Az elektrolizálóban idővel lerakódhatnak szennyeződések, korróziós termékek vagy más anyagok, amelyek csökkenthetik az elektrolízis hatásfokát, vagy károsíthatják az elektródákat vagy az elektrolitot.

A globális hidrogénpiac kiépítéséhez jelentős szállítási kapacitást érintő beruházásokra lesz szükség, valamint számos technológiára, amelyek lehetővé teszik a hidrogén hatékony értéklánc kialakítását

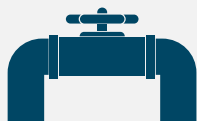
Skálázhatóság és termelési méret: tárolási, szállítási kapacitás és infrastruktúra

1 A hidrogén fizikai tulajdonságai megnehezítik annak tárolását és szállítását



- A hidrogén energiasűrűsége magas tömegre vetítve (33,3 kWh/kg), de viszonylag kicsi térfogatra számítva (3 kWh/köbméter).
- Ez azt jelenti, hogy nagyobb mennyiségű hidrogént kell szállítani ugyanannyi energia átadásához. A szállítás során tehát vagy az elérhető térfogatot vagy a gáz sűrűségét kell növelni.
- Megoldást nyújt a sűrítés, a cseppfolyósítás, és a más gázokkal való bekeverés.

2 A hidrogén felhasználási helye



- Jelenleg az előállított hidrogén nagy részét on-site használják fel. Ahhoz, hogy ez megváltozzon, és a hidrogén elterjedjen (háztartások, közlekedés) széleskörű infrastruktúra kiépítésére van szükség, melyhez határokon átnyúló együttműködésre is szükség lesz.
- A nagymennyiségű hidrogéntermeléshez sokszor a helyszín és az inputok adottak (a megújuló energia és a víz közelsége), a kihívást a felhasználási helyre való szállítás fogja jelenteni.

3 Szállítás módja és mértéke



- A közúton való hidrogén szállítás nagy mennyiségben drágább és nagy logisztikai kihívással járna, de kis mennyiségben kivitelezhető:
 - Rövid távú szállításra a sűrített hidrogén kis mennyiségben, szállítójárműveken keresztül megvalósítható.
 - Ha hidrogént nagyobb távolságra kell szállítani, gyakran alkalmazzák a cseppfolyósítást, így akár 3500 kg-ot is szállítható teherautóval.
- A zöld hidrogén legígéretesebb szállítási módja azonban a sűrített hidrogént szállító csővezetékek. Jelenleg mindössze 5000 km hidrogén célú csővezeték van, ami elenyésző a 3 millió km fosszilis gázvezetékhez képest.

A hidrogéniparnak még további kutatásokat kell végeznie annak megállapítására, hogy az elektrolizálók hogyan működnek részleges vagy alacsony terhelés esetén

Skálázhatóság és termelési méret: a technológiai adottságokból fakadó fluktuáció

1 Infrastruktúra és berendezések hiánya



- A szektor egyedi infrastruktúra és gépalkatrész igényel bír, melyet csak néhány szállító biztosít.
- Az ellátási lánc meghibásodása üzleti fennakadásokat okozhat, mivel az elektrolízis berendezés alkatrészeinek és a hidrogénüzemanyag-ellátó termékeknek csak néhány hiánypótló harmadik fél beszállítója van. Ezek a szállítók egyedi igényeknek megfelelő, egyedi alkatrészeket gyártanak, és kevés beszállító képes ilyen speciális alkatrészeket rövid időn belül szállítani.
- Az elektrolizálók nagyfokú skálázhatósága miatt a gyártóknak fel kell készülnie, hogyan biztosítják a teljes méretválasztékához szükséges alkatrészeket.

2 Időszakos és ingadozó megújuló energiaellátás



- A megújuló energiaforrásokból származó villamos energia ellátásnak ingadozása, esetleges akadozása vagy megghiúsulása komoly kockázatot jelent a stabil zöldhidrogén termelésben és a kapacitások tervezésében.

3 Szezonális ingadozás az igényekben



- A hidrogén az energiatermelés és felhasználás szezonálisitása miatt a megújuló erőforrások évszakok közötti átcsoportosítására is felhasználható. Megfelelő tárolási kapacitás hiányában azonban a téli évszakokban megugró keresletet a megújuló energiára épülő hálózat nem feltétlenül tudja biztosítani.

A zöld hidrogén nettó zéró üzemanyagnak tekinthető, mivel várhatóan semleges hatással lesz a Föld víz- és oxigénkészleteire, a vízellátásban mégis problémákat szülhet, ezért fontos az alternatív vízforrások lehetőségének kutatása

Vízfelhasználás: vízellátás

1 Lokális vízellátás



- A probléma elsősorban nem a globális vízkészletekre gyakorolt hatásban rejlik, hanem lokális szinteken. Különösen az aszályok intenzitását fokozó klímaváltozás miatt jelenthet fontos kockázatot a jövőben.
- Ez megnehezíti a projektek indítását olyan területeken, ahol a lakosság számára is kevés édesvíz áll rendelkezésre. Ugyanakkor, gyakran pont ezek azok a területek, ahol a megújuló napenergiatermelés elterjedtté vált.
- Az ökológiailag fenntartható működéshez nemcsak az energiaellátáshoz szükséges optimalizálni az elektrolizáló telepek méretét hanem a helyszín vízrendszereinek adottságaihoz is, elkerülve azok túlzott megterhelését.

2 Sós víz használat



- A sótalanítás és a vízfeldolgozás csak körülbelül 0,10 dollárral növeli egy kilogramm hidrogén előállításának költségét, miközben az elektrolízishez szükséges villamos energia 1%-át használja fel.
- A problémát az okozza, hogy a tengerbe visszapumpált sóoldat károsíthatja a tengeri ökoszisztémákat.
- Előnye, hogy nem édesvíz készleteket hasznosít, és 0. lépésként segíti a víztisztítási folyamatot, mely az elektrolízist közvetlenül megelőzi.

A megújuló energia előállításához nincs szükség annyi vízre, mint a fosszilis forrásból termelt energia esetén, ezért a zöldhidrogén előállítása a teljes folyamatot tekintve hasonló, vagy akár kevesebb vizet igényel mint más hidrogén előállítási formák

Vízfelhasználás (liter/kg)	Zöldhidrogén	Szürke hidrogén	Kék hidrogén
Közvetlenül előállítás során	9	4,5	25 (CCS folyamat nélkül)
Teljes folyamat során	20-30	21-27	32-39 (A CCS folyamattal)

Az elektrolízis során használt víz és elektrolitok megfelelő kezelése elengedhetetlen, szivárgás, szennyeződés a gyártás és a környezet számára is súlyos problémát okozhat

Vízfelhasználás: elektrolízis során keletkező oldatok jelentette kockázat

1 Deionizált víz használatának kockázatai



- A deionizált víz agresszív és korrózív, mivel alacsony pH értékű és magas affinitása van az ionok iránt. Fel tud oldani fémeket és más szennyeződések a csövekből, tartályokból vagy más felületekről, amelyekkel érintkezik. A levegőből széndioxidot oldhat, szénsavvá alakítva azt.
- Ha a deionizált vizet a környezetbe engedik, megváltoztathatja a természetes vizek pH- és ásványi anyag-egyensúlyát, károsíthatja az élőlényeket és az ökoszisztémákat.
- A tengervíz használata megfelelő deszalinizációs technológiákkal kevesebb hulladéktermeléssel és kevesebb környezeti hatással járó alternatíva lenne, azonban ez a technológia még csupán kutatási fázisban tart.

2 Elektrolitok környezetbe jutása (NaOH, KOH)



- Az elektrolit idővel lebomolhat szennyeződések, korrózió, vagy szivárgás miatt. Más fémek, vagy vegyi anyagok, amelyek a vízben, vagy elektródákban jelen vannak szintén szennyező hatásúak lehetnek, így az elektrolitot időnként tisztítani, vagy cserélni kell.
- A használt elektrolit erősen lúgos oldat, pH-értéke 13, vagy annál magasabb lehet, ami súlyos égéseket, vagy irritációt okozhat a bőrön, szemeken, légutakon. Különböző módszerek léteznek a használt elektrolit kezelésére: Semlegesítés (Savas kezelés a pH szabályozásához és fém eltávolításához), Elektrokémiai kezelés (Elektromosság használata fémek eltávolításához), Biológiai kezelés (Mikroorganizmusok az anyagok lebontásához), Párologtatás (Víz párologtatása és szilárd anyagok koncentrációja)

A hidrogén természete komplikálja az iparág elterjedését, elengedhetetlen feltétele a biztosítói és támogatási rendszer kiépítésének a személyi és vagyoni biztonság megléte

Biztonságtechnika

1 Általános tapasztalati hiány



- Csökkenteni kell az üzemeltetés összetettségét, csökkenti a kockázatokat és javítani a zöld hidrogén-létesítmények teljesítményét.
- Még mindig bizonytalan, hogy melyik eljárás lesz az előnyben részesülő technológia, ha lesz egyáltalán ilyen. A kockázatok felmérése jelenleg is folyik, a biztonsági előírások és a szakemberek képzése még nem lehet teljeskörű, amíg nincs elég tapasztalat a technológiák használatában.
- További veszélyek közé tartható a víz megfagyása a tartályban, valamint a membránok szakadása – kezelésük további kutatásokat igényel.

2 Magas robbanásveszély



- Az elektrolizálóknál a gázáramlás kezelésében elkövetett hibák balesetekhez vezethetnek
 - Lúgos elektrolízis berendezésekben a különböző gázok véletlen keveredése tüzet okozhat. A meggyulladt hidrogént tovább táplálja az elektrolízis során létrejövő tiszta oxigén is.
 - Sérülés, robbanás esetén a lúgos oldat természetbe kerülése is súlyos kockázatot jelent. Ezen oldat kezelése önmagában is kihívást jelent.
 - Az elektrolizálókat a nagyfeszültség és a rövidzárlat (az elektródák korróziója miatt) is érinti, ami robbanáshoz vezethet.

3 Biztonsági rendszerek testreszabhatósága



- Az alkatrészeknek megbízhatónak és veszélyes környezetre tervezettnak kell lenniük, működésüknek a technológia elterjedésével párhuzamosan újabb biztonsági előírásoknak kell megfelelni.
- Egy integrált vezérlő- és biztonsági rendszer (ICSS) szintén kritikus eszköz az optimális indítási/leállítási szekvencia biztosítása érdekében, hogy folyamatos és azonnali diagnosztikát nyújtson az üzemeltetőknek.

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86
— Fenntarthatósági elemzés és környezeti hatások	86
— Társadalmi elfogadottság és közösségi előnyök	90

A hidrogéntermelésre vonatkozó nemzetközi szabványok és politikák kidolgozására és végrehajtására van szükség ahhoz, hogy a döntéshozók sikeresen fejlesszék a hidrogénpiacot

A zöldhidrogén elfogadása számos szempontból fontos: a társadalom, a közösség és a piac szempontjából. Az elfogadás mértéke hatással van a piaci penetráció szintjére, ami befolyásolja az ipari növekedést és az energiahatékonyságot.

Társadalmi-politikai elfogadás

- A hidrogén **elfogadása kulcsfontosságú a közösség, az érdekeltek és a döntéshozók részéről.**
- Mivel jellemzően a fosszilis tüzelőanyagok környezetbarát alternatívájának tekintik, **a hidrogéntekológiák társadalmi-politikai elfogadottsága általánosan véve magasabb, ingadozása a közvélemény bizalmán alapul.**
- A **gazdasági növekedés az új munkahelyek teremtése, a növekvő energiabiztonság, az üzleti tevékenységek bővülése** mind olyan tovagyűrűző hatások, melyek hosszú távon **hozzájárulnak a zöldhidrogénnel szembeni bizalom épüléséhez.**

Közösségi (lokális) elfogadás

- Az energiapolitika elfogadásának kérdése a helyi érintettek, például a **közösségek lakói és a helyi hatóságok által hozott konkrét döntések elfogadására** vonatkozik. Ebben a kontextusban az elosztási előnyök, a környezeti értékek és a megosztott költségek gyakran meghatározzák a közösségi elfogadásának vagy ellenállásának mértékét.
- A **"NIMBY"** (Not-In-My-Back-Yard) **hatás** általában akkor lép fel, amikor **egy adott technológia**, például a hidrogén üzemanyagcellás erőmű közösségben való **elhelyezésének költségei meghaladják az elosztási előnyöket.**
- A **zöldhidrogén technológia alapvetően pozitív visszhangra talál a lakosság körében**, mivel az környezetbarát és fenntartható energiaforrást kínál. Azonban az **elfogadottság szintje egyértelműen csökken, amikor nagyméretű infrastruktúráról van szó** a közösség területén.

Piaci elfogadás

- A zöldhidrogéntekológia piaci elfogadása kulcsfontosságú a terjedéséhez. **A piaci elfogadás** azt jelenti, hogy a **hidrogén technológiák elfogadásra találnak a fogyasztók, befektetők, beszállítók és más piaci szereplők körében.**
- A hidrogéntekológia **elfogadása általában gyorsabb demonstrációs, a fogyasztói tájékoztatást megcélzó, projektekkel**, amelyek növelik a fogyasztók tudatosságát és elfogadási folyamatát.
- A **befektetők és a vállalatok szintén jelentős szerepet játszanak érdekelt felekként**, mivel befolyásolják a technológia forgalmazását és a politikai döntéshozatalt.
- A **fogyasztók áttérése** a hidrogéntekológiákra és az energiaiparban történő **befektetések hozzájárulnak a technológiai elterjedéshez** és a közösségi elfogadáshoz.

A zöld hidrogén infrastruktúra kialakítása nagy mennyiségű szabad földterületet és vízellátást igényel, így a tervezési folyamatok fontos eleme lesz a lokáció optimális meghatározása

A közvetlen környezetre és élővilágra gyakorolt hatás

Növény- és állatvilágra gyakorolt hatás

- Az emberek és állatok egészségét és élőhelyét jelentősen befolyásolhatja a megújuló energiaforrások elterjedése. A rossz tervezés felbecsülhetetlen károkat okozhat a természetes élővilágra.

A termőföldekre gyakorolt hatás

- Az agrárszektor földterületi igényei mellett megjelenik a megújuló energiaforrások telepítéséhez szükséges földterület kialakítási igénye. Az olyan tevékenységek, mint az erdőirtás, a nagy sűrűségű infrastruktúra és a talajszennyezés végső soron mind fokozott erózióhoz és ökológiai egyensúlyhiányhoz vezetnek.
- Fenntartásokat okoz, hogy a potenciális exportőrök által várt hidrogéntermelés mennyisége előállítható-e a megújuló energiatermelés előre jelzési korlátjának ellenére. (pl. napsugárzás mértéke, a szélsébség stb. elegendő lesz-e)
- Vagy, a tervezett termeléshez további megújuló energiatermelő telepeket kell létrehozni.

- A nagy volumenű zöldhidrogén termelés további szabad földterületeket igényel. Ezt minimalizálандó, a megújuló energiatermelés hatékonyságát kell fejleszteni.

Az édesvíz rendelkezésre állására gyakorolt hatás

- A zöld hidrogén előállítási lánc egyik legnagyobb ellentmondása, hogy a sivatagi területek bőséges napenergiaforrást kínálnak, elkerülhető általa a szántóföldekre gyakorolt negatív hatás, de a működtetéséhez (pl. tisztítás) és a hidrogén előállításához szükséges vízigény jelentős akadályt képez.

- A hatékony tervezéshez segítséget nyújthat a régiók vízhiány mértékét mérő Water Scarcity Footprint. A mutató összeveti a vízigény és a rendelkezésre álló vízmennyiség értékeit.

- Az elektrolízis technológia megválasztása különösen kihat a környezeti fenntarthatóságára vízhiányos környezetben, mivel a különböző technológiák különböző mennyiségű vizet igényelnek.

A zöld hidrogén termelés egy jelentős lépés a nullkibocsátási célok eléréséhez, az ezt övező infrastruktúra kiépítése azonban egy globálisan megoldandó feladatot jelent

A globális ásványkincs-kitermelésre gyakorolt lehetséges hatások

- A technológiák nehéz- és ritka földfém igényesek. A szennyezés és kitermelés kockázata magas, upstream jelenik meg.
- A kitermelés során pl. ólom és kadmium kerülhet a környezetbe.
- Magas az ellátási lánc kiterjedése a fejlődő országok exportterveinek is

- A technológiához szükséges ásványi anyagok újrahasznosítása kidolgozatlan, és mértéke jelenleg közel sem elégséges.
- Az óceánok fenekén nagy mennyiségű ásványi anyag található, annak kitermelése ugyanakkor a tengeri ökoszisztémára lehet kritikus hatással

- Mind a megújuló energia termelési, mind az elektrolízis infrastruktúrához sokféle ásványi anyag szükséges. Egyes anyagok elérhetősége korlátozhatja elterjedésüket.
- SOEC (Lantán, ittrium, nikkel); PEM (indium), Alkáli (nikkel)

Klímaváltozást érintő hatások

- A zöld hidrogén termelés a jövőben akár nulla kibocsátást is elérhet.
- Mindazonáltal a hidrogén infrastruktúra kiépítése és szállítása során jelentős kibocsátás keletkezik.

- A hidrogénszállítással kapcsolatos kibocsátások nagy része a hidrogénnek a könnyen szállítható vagy tárolható formává, például folyadékká történő átalakításához szükséges energiamennyiségtől függ
- A teherhajók és a csővezetékes szállítás során keletkező kibocsátásokat is figyelembe kell venni

- A hidrogénre való áttérés által generált kibocsátáscsökkentési potenciál tehát a downstream folyamatok szén-dioxid-kibocsátásától is függ.

A problémák ideiglenes lokális szintű kezelése átgyűrűzik más régiókba

- Az üvegházhatást okozó gázok gyors ütemű csökkentéséhez az EU-ban megnő a hidrogén iránti kereslet. A hidrogénhez szükséges zöld energia igény 2030-ra elérheti a kontinens jelenlegi megújulóenergia-termelésének körülbelül a felét.

- Az EU nagymértékben a hidrogénimportra fog támaszkodni az előre jelzett kereslet kielégítése érdekében.

- Számos alacsony jövedelmű ország jó helyzetben lehet ahhoz, hogy az európai ipar szén-dioxid-mentesítésének lehetővé tétele érdekében üvegházhatást okozó gázok exportőre legyen.
- Ennek elkerüléséhez ezekben az országokban meg kell teremteni a hidrogénelőállítás zöld formáját.

Tartalom

■ Zöldhidrogén technológia	4
■ Zöldhidrogén piaci kilátásai	45
■ Zöldhidrogén előállítás gazdasági mutatói	60
■ Kockázatok és kritikus tényezők	70
■ Fenntarthatósági és társadalmi hatások	86
— Fenntarthatósági elemzés és környezeti hatások	86
— Társadalmi elfogadottság és közösségi előnyök	90

Az infrastruktúra fejlesztése változásokat hozhat az életkörnyezetben és a közösségi életben, így a lakossági vélemények és igények figyelembevétele elengedhetetlen



Kezdeti megértés



A hidrogén kezdeti megértése eltér a különböző földrajzi és társadalmi-gazdasági státuszban élő emberek között. A hidrogént könnyű a bombával, robbanással vagy balesettel asszociálni, viszont az információkkal vagy előzetes ismeretekkel rendelkezők a kutatások szerint jobban támogatják a hidrogén-technológiák használatát.



Energiaellátás biztonsága



Aggályokat kelthet a hidrogén hozzáférhetősége a kiskereskedelmi pontokon, például az üzemanyagtöltő állomásokon és a hidrogénelosztó hálózaton. A fogyasztói elfogadás egyik fő motivációjának a közeli kiskereskedelmi pontokon való elérhetőséget tekinti a lakosság.



Biztonság, szabályozás és szabványok



A hidrogén háztartási célú felhasználásakor a hidrogén gyúlékonyságával és robbanásveszélyével kapcsolatos aggodalmakat fokozza, hogy a hidrogénláng égés közben szinte láthatatlan és szagtalan, emellett megkérdőjelezhető a segélyszolgálati dolgozók képzettsége és felkészültsége a hidrogén kezelésével kapcsolatban.



Gazdasági haszon és költség



A hidrogén előállításához és szállításához szükséges energiaköltségek mértéke, a hidrogén, mint üzemanyag ára, a technológiák hidrogénfelhasználásra való átalakíthatósága és az autók üzemeltetésének költségei fontos tényezők a technológia lakossági adaptálásában. Fontos a helyi közösségek kompenzálása, munkaerőigény, közösségi juttatások.



Kormányzati intézkedések, szakpolitikák



Ha hidrogénipar fejlesztésére irányuló (helyi) kormányzati érdeklődés és hosszú távú jövőkép hiányzik, az hozzájárul a közvélemény alacsony tudatosságához, negatív megítéléséhez és a piaci elterjedés nehézségeihez. Ugyanakkor, a kormányzati finanszírozásnak el kell kerülnie a támogatás túlzott mértékű alkalmazását a kutatás-fejlesztést (K+F) finanszírozó támogatásokhoz képest.

A technológia társadalmi elfogadottsági mérését és kockázatait egy németországi tanulmány dolgozta fel, Magyarországon hasonló kutatást nem végeztek, de az eredményeket általános érvényűnek tekintettük az kulturális közelség okán

A projektek sikeres megvalósításához erőteljes társadalmi szerepvállalásra és támogatásra van szükség, melyhez a bizalom és biztonság kiépítése kulcsfontosságú



Környezetvédelmi megfontolások



Megkérdőjelezhető a hidrogéntekológiák és azok működtetéséhez szükséges megújuló energiaforrásokhoz szükséges infrastruktúrának és terület nagyságának biodiverzitásra gyakorolt hatása valamint a hidrogénfejlesztést támogató környezetvédelmi jogszabályok esetleges hiánya.



Hidrogéngyártási módszer



A zöldhidrogén megítélése alapvetően pozitív a fosszilis vagy nukleáris energiával előállított hidrogénhez képest. Bizonytalanság övezi ugyanakkor a hidrogéntermeléshez használt régi napelemek újrahasznosítását, hasznos élettartamuk lejárta után



Hidrogéntárolás



A villamosenergia-tárolás folyamatának ismerete alacsony. A főbb aggályok között szerepel a biztonsági intézkedések bevezetése (üzemanyagtöltő állomásokon, gáztárolókban) és a tárolótartályok védelme a külső hatásoktól (pl.: vandalizmus, szélsőséges időjárás).



A hidrogén alkalmazásával kapcsolatos aggályok



A hidrogénüzemű járművek teljesítménye, ár-érték arányának nem ismerete, valamint a hidrogénalapú energia lakossági szinten való használatának megbízhatósága és határfoka nehezíti azok elfogadottságát.



Elhelyezkedés és közelség



Az elfogadás a környezetet érintő kérdések mellett (szükséges édesvíz és földterület mennyisége) a közvetlen és közvetett munkahelyteremtés lehetőségeitől és a helyi és hazai piac előnyben részesíthetőségétől függ.



Bizalom és kommunikáció



A lakosság számára közérthetővé és elfogadhatóvá kell tenni a hidrogén használatát. Kutatások szerint a végfelhasználók csoportja nem bíz a médiában elérhető információban. A tájékoztatás csatornájának és formájának kiegyensúlyozottnak, nyíltnak és őszintének kell lennie és a társadalmi csoportok széles spektrumát kell elérnie.

