

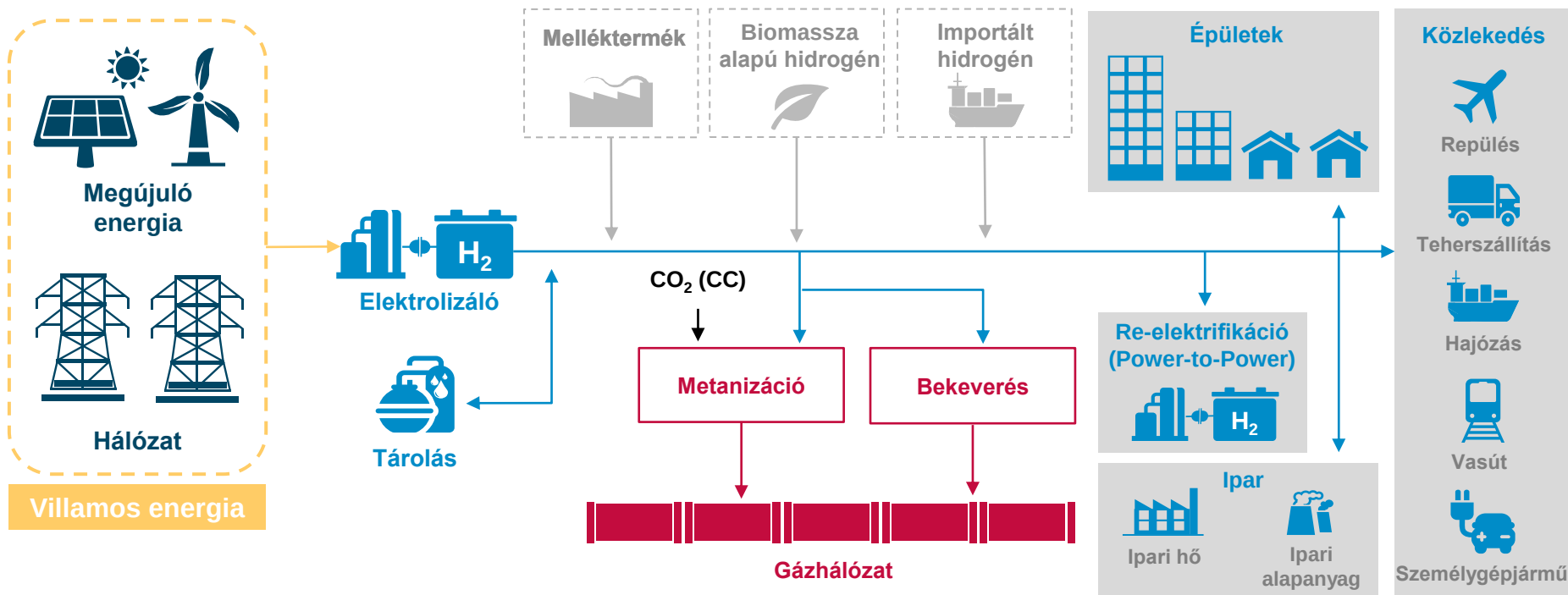
Villamosenergia-piacon alkalmazható hidrogéntechnológiák áttekintése

Zöld H2 a villamosenergia-rendszerben

Gyurity Erik
Parragh Viktor

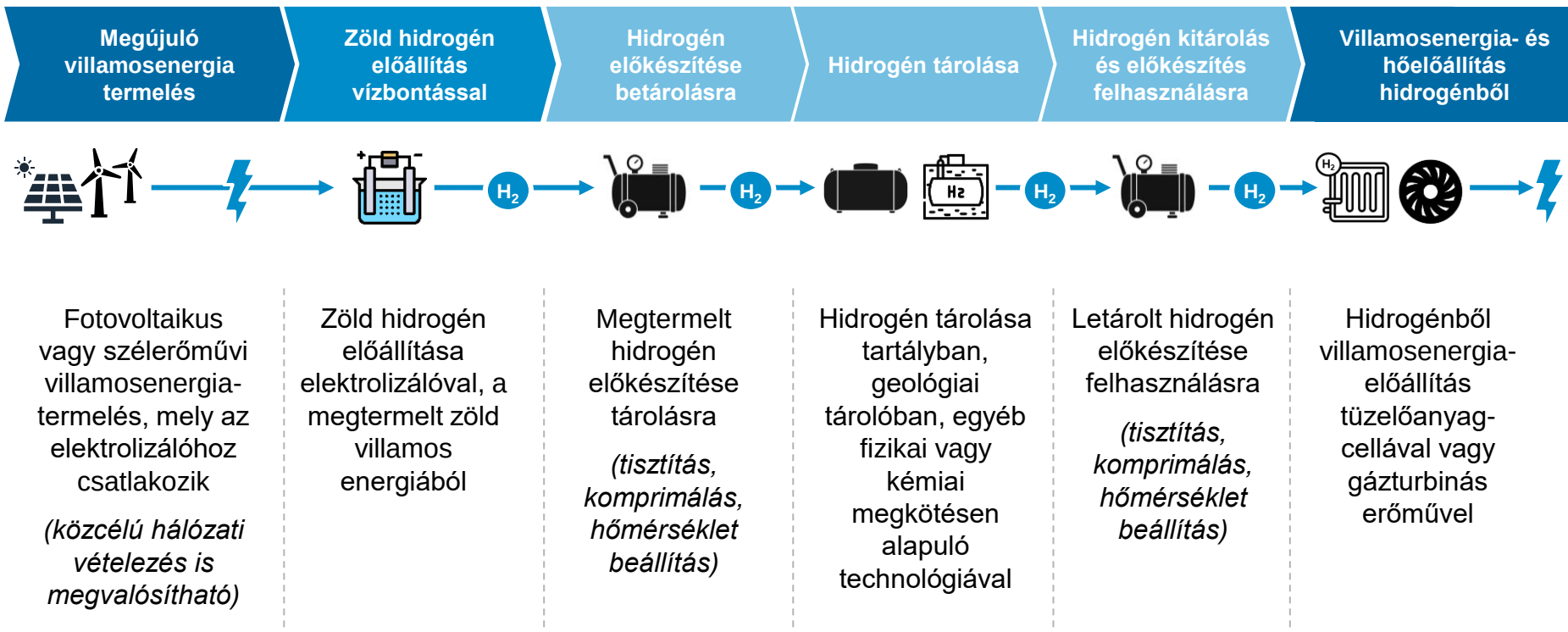
Budapest, 2023.09.30.

A zöld hidrogén támogatja az időjárásfüggő megújulók integrációját a villamosenergia-rendszerbe és a végfelhasználói szegmensekbe



A Power-to-Hydrogen-to-Power technológiák támogatják az időjárásfüggő megújulók integrációját a villamosenergia-rendszerbe, lehetővé teszik a megtermelt zöld energia rövid távú és szezonális tárolását, valamint növelik a hálózat rugalmasságát és kiegyenlítő képességét.

A zöld hidrogén előállítás és vissza-elektifikálás értéklánca



H₂ előállítás

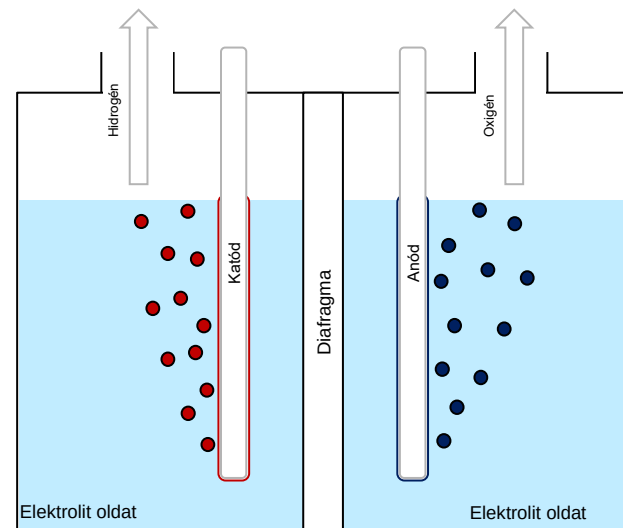


Elektrokémia és az elektrolízissel előállított hidrogén

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

Elektrolizáló cella felépítése

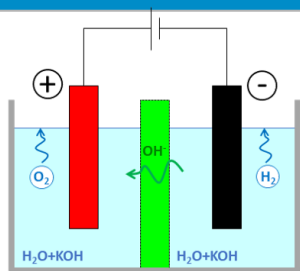
- **Elektrolit:** Az elektrolizáló cella közegét elektrolit tölti ki, ami olyan anyag, amely elektromosan vezető és lehetővé teszi az ionok mozgását. Az elektrolit lehet folyékony vagy akár kismértékben vezető szilárd anyag is.
- **Elektródok:** Az elektródok olyan vezető anyagok, amelyeknek szerepe 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.



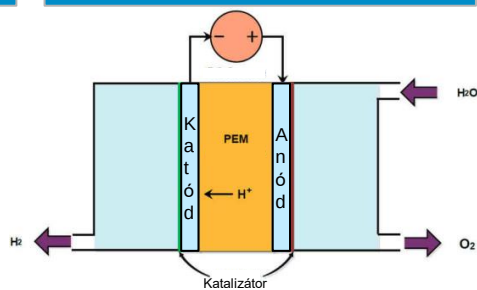
A villamosenergia-rendszerbeli alkalmazások szempontjából a demonstrált elektrolizáló technológiákat vizsgáljuk

Hidrogéntermelő elektrolizáló technológiák

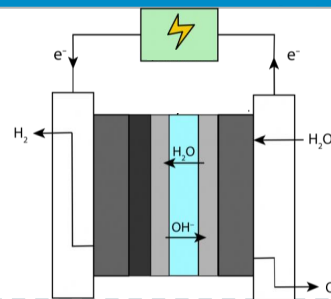
Alkáli/Lúgos elektrolízis



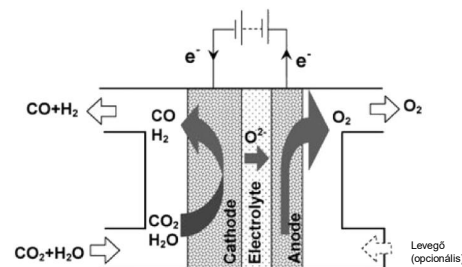
PEM elektrolízis



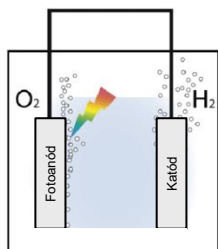
AEM elektrolízis



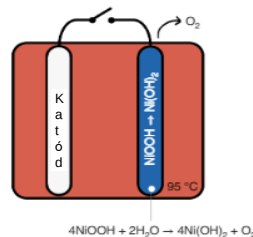
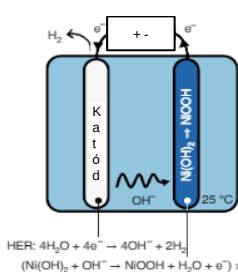
SOEC elektrolízis



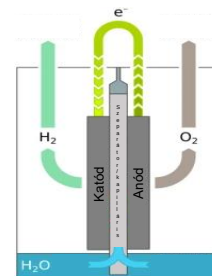
Fotoelektrokémiai vízbontás



E-TAC



CFE

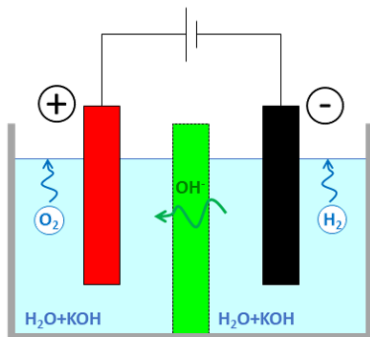


Lúgos / Alkáli elektrolizáló (AWE) Technológiai összefoglaló

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 H₂ és az O₂ 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



2023



2030

- » 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

Proton cserélő membránon elektrolizáló (PEM)

Technológiai összefoglaló

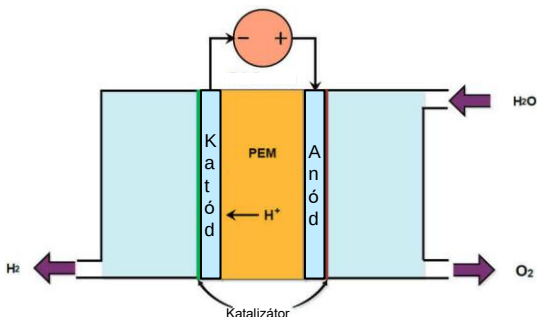
Elektrolizáló technológia

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 (20–80°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



2023

- » Kereskedelmi forgalomban kapható, második leggyakrabban alkalmazott

Technológiai
fejlesztések területe



2030

- » Katalizátorok, elektródok anyagának fejlesztése

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

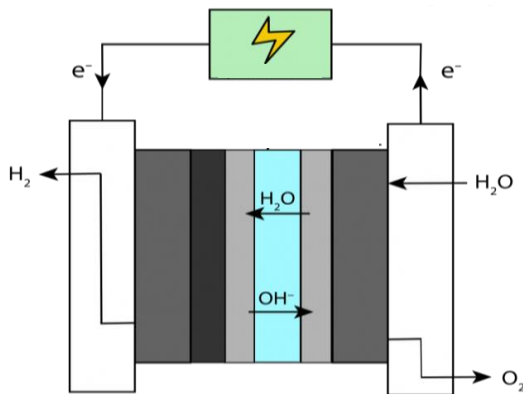
Anion cserélő membránon elektrolizáló (AEM)

Technológiai összefoglaló

Elektrolizáló
technológia

AEM víz elektrolízis

» PEM előnyei 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



TRL 7-8



2030

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

Technológiai
fejlesztések területe

- » Katalizátorok, elektródok, membránok anyagának fejlesztése

Előnyök

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

Korlátok

- Membrán technológia nem kiforrott – fejlesztés szükséges

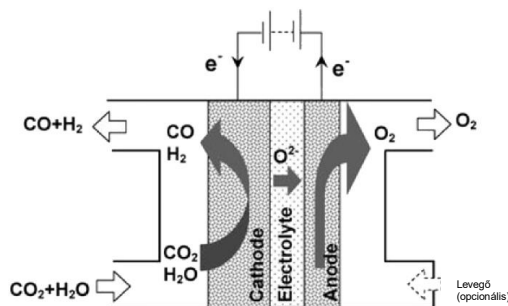
Szolid-oxidos elektrolizáló Technológiai összefoglaló

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 H₂, 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 O₂-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

Hazánkban az alkáli és PEM technológiás elektrolizálók elterjedése várható a villamosenergia-rendszerbeli alkalmazások esetén

	Alkáli elektrolizáló	PEM elektrolizáló	Anion cserélő membrános elektrolizáló	Szilárd-oxidos elektrolizáló
VE-rendszer alkalmazás	Időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Potenciálisan időjárásfüggő megújuló energia termelés integrációja	Folyamatos H ₂ előállítási alkalmazások, de elsősorban hőtermelés
TRL	TRL 9 	TRL 8 	TRL 6 	TRL 6 
Működési hőmérséklet	60 – 80 °C	50 – 80 °C	50 – 60 °C	700 – 900 °C
Működési nyomás	1 – 30 bar	30 – 70 bar	1 – 30 bar	1 – 30 bar
Hidrogén termelés	<760 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.5	<40 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.9999	<1 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.99	<1 Nm ³ H ₂ / óra Tisztaság: >99.999
Rendszer válasz	másodperc	ezredmásodperc	n/a	ezredmásodperc
Hazai potenciál	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Korlátozott, az alacsony TRL szint miatt	Korlátozott, az alacsony TRL szint miatt

H2 tárolás



H₂ tárolási módszerek összefoglaló ábrája

- Sűrített hidrogéngáz
- Cseppfolyós hidrogén

Fizikai tárolási
módszerek



Geológiai
tárolási
módszerek



- Sóbarlang
- Kimerült szénhidrogén
mező
- Akvifer
- Bélelt sziklabarlang

Fizikai
megkötésen
alapuló
módszerek



- Adszorpció

Kémiai
megkötésen
alapuló
módszerek



- Fém-hidridek
- LOHC
- Ammónia



Nyomástartó edény (sűrített gáz)

Technológiai összefoglaló

Működés

A hidrogén gáz állapotban, sűrítve kerül tárolása gömb alakú vagy hengeres nyomástartó tartályokban.

A sűrítés nagy teljesítményű kompresszorral történik, jellemzően 200-700 bar közötti nyomásra.



Alkalmazási területek

- Helyhez kötött alkalmazások elsősorban ipari folyamatokban
- Villamosenergia-tárolás (PtG)
- VE-rendszer kiegyenlítés
- Járművi alkalmazások

Biztonság

Biztonsági kockázatok elsősorban a magas nyomásból fakadnak. Jól bevált biztonsági gyakorlatok elérhetők.



Biztonságos

Technológiai érettség

Érett technológia, széleskörben alkalmazott

TRL 9



Energetikai hatékonyság

90 – 95%
(sűrítés és kezelés)

Tárolási költség

0,19 – 0,27 USD / kg

Tárolási időtáv

Napok – Hetek

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

350-700 bar

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, viszont a szezonális tároláshoz szükséges mennyiségek tárolása jelentős méretű tárolói infrastruktúrát igényel

Előnyök

- Érett és bizonyított technológia
- Elhanyagolható szintű szivárgás
- Könnyű hozzáférhetőség, sztenderd termék
- Alacsony költség

Korlátok

- Magas nyomásigény (350/700 bar) miatt a tároló anyagával szemben jelentős követelmények
- Alacsony tárolási sűrűség miatt kisebb a tárolt energiamennyiség

A nyomástartó H₂-tartályok 4 típusa lehetővé teszi az alkalmazásnak megfelelő sűrített gázos tárolási megoldás megtalálását



I. típusú hidrogéntartály

- Minden sorozatban gyártott H₂-tároló nyomástartó edény **hengeres alakú** a nagy nyomásból eredő feszültség-eloszlásból és a gyártási folyamatból kifolyólag
- Anyaga **fém, általában acél**
- Névleges nyomása **200 bar-os tartományban** van jellemzően
- Széles körben alkalmazott a gáziparban**, szállítótartályként és helyhez kötött nyomástartó edényként is



II. típusú hidrogéntartály

- Falát **fémköpenyre felvitt, műgyantába ágyazott üvegszállal vagy szénszállal erősített köpeny** alkotja
- A kompozit-köpeny csak a hengeres részt veszi körül
- Kismértékű súlyelőnye** van a kisebb falvastagság miatt
- Akár **1000 bar** nyomásig használható
- Főleg helyhez kötött alkalmazásokban**, például hidrogén-töltőállomások tárolótartályaiban használt



III. típusú hidrogéntartály

- Bélése fémből**, főleg alumíniumból készül, melyet **szénszál erősítésű kompozit-köpennyel** vesz körül
- Magas a tömegarányos energiatartalma**
- Tipikus nyomása 350 vagy 700 bar**
- Főleg mobil alkalmazásokban** használt, pl. üzemanyag-cellás járművekben
- Helyhez kötött alkalmazása nem elterjedt a nagyobb anyagköltsége miatt.



IV. típusú hidrogéntartály

- A legújabb fejlesztésű, sorozatgyártásban lévő tárolótartály
- Bélése műanyagból**, jellemzően poliamidból vagy polietilénből készül, melyet **erősítő** (többnyire szénszálal) **kompozitburkolat** vesz körül
- Jelentősen kisebb tömeg**
- Akár **700 bar** nyomásig használható
- Jellemzően **szállítási és mobil alkalmazásokban** használt



V. típusú hidrogéntartály

- Fejlesztések jelenlegi iránya, **demonstrációs fázisban** lévő technológia, egyelőre nem került sorozatgyártásba
- Teljes szerkezete **kompozitból készül, nincs bélése**
- A fejlesztési célok az **alacsonyabb súly** és **megnövelt nyomástartomány** elérése

Cseppfolyós hidrogén

Technológiai összefoglaló

Működés

A hidrogén cseppfolyós állapotban, nagyon alacsony hőmérsékleten kerül tárolásra speciálisan kialakított (gömb alakú, szigetelt, folyamatos hűtést biztosító) tartályokban.

A cseppfolyósításhoz nagy teljesítményű hűtőrendszer szükséges.



Alkalmazás VE-rendszerben

- Nem javasolt a hosszú távú tárolás mellett fellépő veszteségek és a magas átalakítási költségek miatt

Alkalmazási területek

- Űripár, rakétameghajtás
- Helyhez kötött alkalmazások elsősorban ipari folyamatokban

Biztonság

Biztonsági kockázatok elsősorban a nagyon alacsony hőmérsékletből fakadnak. Gondos kezelést igényel.



Biztonságos

Előnyök

- Sűrítéshez képest magasabb a tárolt energiamennyiség
- Érett technológia

Technológiai érettség

Érett technológia, széleskörben alkalmazott

TRL 9



Energetikai hatékonyság

80-85%
(vesztés nélkül, csak át- és visszaalakítás)

Tárolási költség

0,19 – 0,27 USD / kg

Tárolási időtáv

Napok

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

1 – 10 bar

Tárolási hőmérséklet

- 253 °C

Korlátok

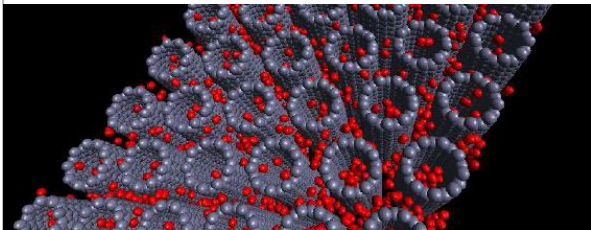
- Komplex tárolóegység szükséges, mely képes a folyamatos hűtésre és a hőszivárgás megakadályozására
- Magas költség
- Hosszú távú tárolásra nem alkalmas a párolgási veszteségek miatt

Adszorpciós tárolás

Technológiai összefoglaló

Működés

Adszorpció során a hidrogén gyenge másodrendű kölcsönhatással megkötődik egy szilárd anyag felületén, majd a felhasználáshoz felszabadításra kerül (többnyire hő hatására). Gyakori alkalmazott adszorbens anyagok az aktív szén, szén nanocsövek, aerogélek, és metal-organic framework-ök.



Alkalmazási területek

- Kisebb léptékű alkalmazásokban, a rendelkezésre álló hely korlátozottsága esetén

Biztonság

Általában biztonságos, kockázatok az anyagstabilitással kapcsolatban merülhetnek fel.



Biztonságos

Technológiai érettség

Laboratóriumi demonstráción túl, kereskedelmi méretekben nem elérhető

TRL 4-7



Energetikai hatékonyság

70-80%
(megkötés és felszabadítás)

Tárolási költség

2 – 6 USD / kg

Tárolási időtáv

Napok – Hetek

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

10 – 100 bar

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Alkalmazás VE-rendszerben

- Nem javasolt a korlátozott skálázhatósága miatt

Előnyök

- Alacsony komplexitás
- Alacsony nyomás szükséges
- Felhasznált anyagok költsége alacsony

Korlátok

- Kereskedelmi méretekben nem elérhető
- Alacsony technológiai érettség
- Alacsony tárolási sűrűség miatt kisebb a tárolt energiamennyiség, melynek növeléséhez magasabb hőmérséklet és nyomás szükséges

Fém-hidridek

Technológiai összefoglaló

Működés

A hidrogén bizonyos fémekkel (fémvegyületekkel) kémiai reakcióba lépve hidrideket (két-komponensű hidrogén vegyületeket) képezve megkötődik. A felhasználáshoz hőmérséklet hatására szabadítható fel.

Gyakori alkalmazott anyagok a magnézium, az alumínium, egyes nátrium és bór vegyületek.



Alkalmazási területek

- Hidrogén tüzelőanyag-cellás járművek
- Villamosenergia-tárolás (PtG)
- Különbféle helyhez kötött és mobilis alkalmazási lehetőségek

Biztonság

Általában biztonságos, kockázatok elsősorban a magas hőmérséklet-igényhez kapcsolódnak.



Biztonságos

Technológiai érettség

Vannak konkrét ipari alkalmazási példák, de még nem széles körben elterjedt

TRL 4-8



Energetikai hatékonyság

70-85%
(megkötés és felszabadítás)

Tárolási költség

6 – 10 USD / kg

Tárolási időtáv

Hetek – Hónapok

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

0,1 – 5 MPa

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C / 100 – 300 °C
(H₂ felszabadítás)

Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, elsősorban rendszerszabályozási célokra, viszont lassabb ciklusideje miatt gyors kiegyenlítésre kevésbé használható.

Előnyök

- Magasabb tárolási sűrűség miatt nagyobb a tárolt energiamennyiség
- Magas biztonság

Korlátok

- Magas hőmérséklet szükséges a H₂ kinyeréséhez
- H₂ felvétel és leadás folyamata lassú

Folyékony szerves hidrogénhordozók (LOHC)

Technológiai összefoglaló

Működés

Hidrogénben szegény, telítetlen vagy aromás funkciós csoportot tartalmazó szénhidrogének (katalizátor jelenlétében) telíthetők hidrogénnel, ezáltal eltárolva azt.

Gyakori alkalmazott anyagok a hangyasav, metanol, formaldehid, benzol-ciklohexán, toluol-metilciklohexán.



Alkalmazási területek

- Sokoldalú, helyhez kötött és mobilis alkalmazási lehetőségek, elsősorban ipari folyamatokban

Biztonság

Biztonsági kockázatok a használt anyagtól függenek. Egyes hordozók mérgezők, és anyagstabilitási kockázatok léphetnek fel.



Biztonságos

Technológiai érettség

Kutatási, demonstrációs fázisban

TRL 5-6



Energetikai hatékonyság

75-85%
(megkötés és felszabadítás)

Tárolási költség

5 – 8 USD / kg

Tárolási időtáv

Hetek – Hónapok

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

0,1 – 1 MPa

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C / 180 – 280 °C
(H₂ felszabadítás)

Alkalmazás VE-rendszerben

- Nem javasolt az átalakítás és visszaalakítás energiaigénye miatt, mely jelentősen csökkentheti a teljes folyamat hatékonyságát

Előnyök

- Egyszerűen, rugalmasan kezelhető tároló közeg tároláshoz és szállításhoz
- Jelentős fajlagos hidrogén tároló kapacitás (nagyobb tárolt energiamennyiség)
- Viszonylag könnyen felszabadítható a hidrogén

Korlátok

- Magas energiaigény az átalakítás és visszaalakítás során
- Egyes hidrogén hordozó anyagok mérgezők

Ammónia

Technológiai összefoglaló

Működés

A hidrogén tárolása ammónia formájában történik, mely nitrogénnel való reagáltatás során áll elő (többnyire Haber-Bosch-eljárással).

A felhasználáshoz a hidrogén visszanyerése katalitikus hőbontással érhető el.



Alkalmazási területek

- Villamosenergia-tárolás (PtG)
- Hidrogén szállítás

Biztonság

Biztonsági kockázatok az ammónia mérgezősége és gyúlékonysága miatt lépnek fel. Jól bevált biztonsági gyakorlatok elérhetők.



Biztonságos

Technológiai érettség

Érett technológia

TRL 9



Energetikai hatékonyság

75-85%
(át- és visszaalakítás)

Tárolási költség

0,91 – 1,09 USD / kg

Tárolási időtáv

Hetek – Hónapok

Tárolási volumen

MWh – GWh

Tárolási nyomás

1 MPa

Tárolási hőmérséklet

25 °C / 400 – 600 °C
(H₂ felszabadítás)

Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, elsősorban hidrogén szállítási célokra

Előnyök

- Hatékony hordozó molekula, alkalmazása alacsony energiavesztéssel jár
- Magas tárolási sűrűség miatt nagyobb a tárolt energiamennyiség

Korlátok

- Hidrogén visszanyeréséhez nagyon magas hőmérséklet szükséges

Sóbarlang

Technológiai összefoglaló

Működés

A H_2 eltárolható sós formációkban létrejött vagy kialakított (pl. oldatos bányászattal) sókavernákban, melyek tulajdonképpen földalatti "tartályként" funkcionálnak. Ezek a formációk megfelelő kapacitás és falvastagság esetén kiemelkedően előnyös tároló megoldások.



Alkalmazási területek

- Villamosenergia-tárolás (PtG)
- Villamosenergia-rendszer kiegyenlítés

Biztonság

Általában biztonságos a réteg zártságából kifolyólag, kockázatok a kőzetfal integritásának sérülése esetén léphetnek fel.



Biztonságos

Technológiai érettség

Évtizedek óta alkalmazott technológia

TRL 9



Energetikai hatékonyság

85-95%
(betárolás és kinyerés)

Tárolási költség

0,19 – 0,27 USD / kg

Tárolási időtáv

Hónapok – Évek

Tárolási volumen

GWh

Tárolási nyomás

55 – 152 bar

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Alkalmazás VE-rendszerben

- Különösen alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra a magas tárolási volumen és kitárolási sebesség, valamint biztonsága és magas tárolási hatékonysága, alacsony költsége miatt.

Előnyök

- Jól bevált technológia, bizonyított kereskedelmi életképesség
- Rövid távú tárolásra is alkalmas, évente többszöri be- és kitárolási ciklus lehetséges
- Magas kitárolási sebesség

Korlátok

- Relatív kevés térségben megtalálható, kevés összesített kapacitással rendelkező formációk

Kimerült szénhidrogén mező

Technológiai összefoglaló

Működés

A kimerült szénhidrogén - elsősorban földgáz - mezőkbe sajtolva a hidrogén megkötődik a porózus kőzetréteg szerkezeti- és rétegcsapdáiban.



Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, elsősorban hosszú távú energiatárolási célra, mivel magas a tárolási volumen, de bonyolult a ki- és betárolás

Alkalmazási területek

- Villamosenergia-tárolás (PtG)

Biztonság

Általában biztonságos a réteg zártságából kifolyólag, kockázatok a formáció integritásának sérülése esetén léphetnek fel.



Biztonságos

Előnyök

- Nagyobb méret a sókavernákhoz képest
- Ismert és alaposan feltárt formációk
- Átalakítással hasznosítható a meglévő infrastruktúra (kutak, csővezetékek)
- Relatív nagy mennyiségben megtalálható formációk

Technológiai érettség

Kutatási, demonstrációs fázisban

TRL 5-8



Energetikai hatékonyság

70-90%
(sajtolás és kinyerés)

Tárolási költség

1,23 USD / kg

Tárolási időtáv

Hónapok – Évek

Tárolási volumen

GWh – TWh

Tárolási nyomás

30 – 150 bar

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Korlátok

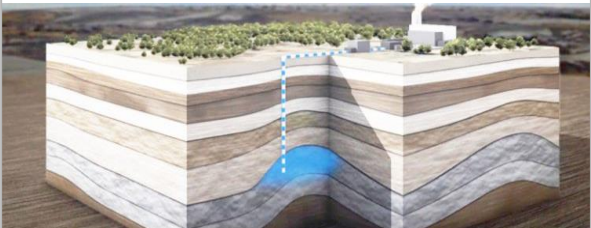
- Szennyeződések tartalmazhat, melyektől meg kell tisztítani a hidrogént a kitárolást követően
- Veszteségek léphetnek fel hidrogén és a formációban található folyadékok, kőzetek, mikroorganizmusok reakciója során
- Versengő alkalmazás (CCS, földgáz tároló)

Akvifer

Technológiai összefoglaló

Működés

A sós vizes akviferek fedőközet által határolt, sóoldattal telített porózus és áteresztő kőzet formációk, melyekbe sajtolva a hidrogén megkötődik a kőzetréteg pórusaiban.



Alkalmazási területek

- Villamosenergia-tárolás (PtG)

Biztonság

Általában biztonságos a réteg zártságából kifolyólag, kockázatok a formáció integritásának sérülése esetén léphetnek fel.

Biztonságos

Technológiai érettség

Kutatási fázisban



Tárolási időtáv

Hónapok – Évek

Tárolási volumen

GWh – TWh

Tárolási nyomás

150 – 170 bar

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Energetikai hatékonyság

70-90%
(sajtolás és kinyerés)

Tárolási költség

1,29 USD / kg

Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, elsősorban hosszú távú energiatárolási célra, mivel magas a tárolási volumen, de bonyolult a ki- és betárolás

Előnyök

- Számos térségben megtalálhatók nagy kiterjedésű formációk

Korlátok

- Felfedezést és feltárást igénylő formációk
- Magas feltárási és kiépítési költségek
- Veszteségek léphetnek fel hidrogén és a formációban található folyadékok, kőzetek, mikroorganizmusok reakciói nyomán
- Versengő alkalmazások (CCS)

Bélt sziklabarang

Technológiai összefoglaló

Működés

H₂ tárolására alkalmasak a nagy szerkezeti szilárdsággal és kis áteresztő képességgel rendelkező sziklabarangok (természetes vagy mesterségesen kialakított, bővített formációk). A szivárgást a tárolásnál magasabb környezeti nyomás és a barlang falára felvitt szigetelő réteg (pl. acél bélés) akadályozza meg.



Alkalmazás VE-rendszerben

- Alkalmas VE rendszerbeli alkalmazásra, elsősorban energiatárolási és kiegyenlítési célokra, mivel magas a tárolási volumen, egyszerű a kitárolás és rugalmasan létesíthető

Alkalmazási területek

- Villamosenergia-tárolás (PtG)
- Villamosenergia-rendszer kiegyenlítés

Biztonság

Általában biztonságos a réteg zártságából kifolyólag, kockázatok a kőzetfal integritásának sérülése esetén léphetnek fel.



Biztonságos

Előnyök

- Mesterséges kialakíthatóság miatt rugalmas elhelyezés (más geológiai formációkkal nem rendelkező régiók számára is elérhető)
- Rövid távú tárolásra is alkalmas

Technológiai érettség

Kutatási, demonstrációs fázisban

TRL 5-7



Energetikai hatékonyság

85 – 95%
(betárolás és kinyerés)

Tárolási költség

0,31 – 0,43 USD / kg

Tárolási időtáv

Hónapok – Évek

Tárolási volumen

GWh

Tárolási nyomás

100 – 250 atm

Tárolási hőmérséklet

20 – 40 °C

Korlátok

- Szigetelő réteg felvitele és karbantartása komplex és magas költségekkel járó feladat

Hazánkban a nyomástartó tartályos és kimerült szénhidrogén mezős tárolás elterjedése várható a VE-rendszerbeli alkalmazásokhoz



Sűrített



Fém-hidridek



Sóbarlang



Kimerült szénhidrogén mező

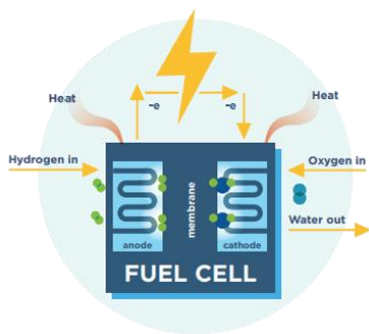
VE-rendszerbeli alkalmazás	Rövidebb távú tárolásra, egyenletes terhelés esetén és kiegyensúlyozásra is	Egyenletes terhelés esetén, kiegyenlítésre kevésbé	Egyenletes terhelés esetén és kiegyensúlyozásra is	Szezonális tárolásra, egyenletes terhelés esetén
Tárolási költség	0,19 – 0,27 USD / kg	6 – 10 USD / kg	0,19 – 0,27 USD / kg	1,23 USD / kg
TRL	TRL 9	TRL 4 – 8	TRL 9	TRL 5 – 8
Tárolási idő	Napok – Hetek	Hetek – Hónapok	Hónapok – Évek	Hónapok – Évek
Tárolási volumen	MWh – GWh	MWh – GWh	GWh	GWh – TWh
Energetikai hatékonyság	90-95%	70-85%	85-95%	70-90%
Hazai potenciál	Magas , rövid távon is alkalmazható és könnyen hozzáférhető technológia	Közép és hosszú távon alkalmazható, tapasztalat-szerzés szükséges	Nincs elérhető geológiai formáció	Közepes , a potenciális geológiai formációk felmérése folyamatban

H2-to-Power



A tüzelőanyag-cellák zöld villamos energiát állítanak elő elektrokémiai úton, magas energetikai hatékonyság mellett

Tüzelőanyag-cellák általános felépítése és működése



A tüzelőanyag-cella **villamos energiát állít elő elektrokémiai úton**, hidrogén és oxigén reakciójával, melynek során **elektromos áram, víz és hő keletkezik**.

- Az anód oldalon hidrogén, a katód oldalon oxigén (levegő) jut a cellába.
- Az elektrokémiai reakció során az anódon a hidrogénionok jönnek létre, a felszabaduló elektronok egy külső áramkörön keresztül jutnak el a katódra. A katódon az oxigén a külső áramkörből elektronokat vesz fel, ezzel negatív ionokat hozva létre.
- A keletkező ionok áthaladnak az anód és a katód oldalt elválasztó elektroliton, a cella típusától függően vagy a pozitív ionok haladnak az anódról a katód felé vagy a negatív ionok az ellenkező irányba.
- A mozgó ionok a másik oldalt elérve reakcióba lépnek az ott található ionokkal és létrehozzák az elektrokémiai reakció végtermékeit, elsősorban vizet.

Tüzelőanyag-cellák előnyei

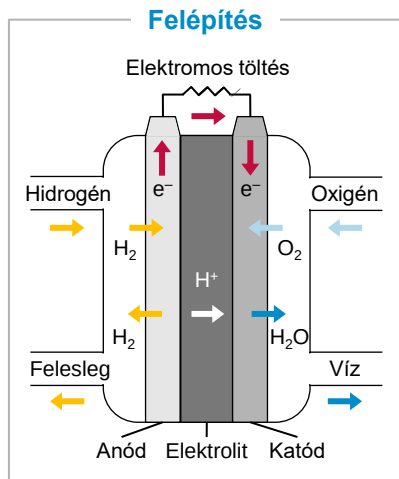
- **Zéró kibocsátású technológia**, amennyiben a felhasznált hidrogén zöld
- **Magasabb energetikai hatékonyság** (akár 60%) az égetésen alapuló hagyományos energiatermelő technológiákhoz képest, amely **kapcsolt hő- és energiatermeléssel** növelhető a hatékonyság (akár 90%)
- **Folyamatos energiatermelésre képes**, ellentétben az akkumulátorokkal
- **Magas megbízhatóság és csendes működés** a mozgó részek hiánya miatt
- **Könnyen skálázható**, a cellákból stack építhető, melyekből nagyobb rendszerek is kialakíthatók

Tüzelőanyag-cella rendszerek elemei

- **Tüzelőanyag-cella**: egyenáramú villamos energiát állít elő, ~1 V kimeneti feszültség
- **Stack**: sorosan kapcsolt, akár több száz cella, a hasznosítható kimeneti feszültség eléréséhez
- **Tüzelőanyag-kezelő**: felhasználhatóvá alakítja az üzemanyagot (pl. tisztítás, nyomás szabályozás)
- **Szabályozó**: átalakítja és szabályozza az output energiát az alkalmazásnak megfelelő elektromos igényhez (áramerősség, feszültség, frekvencia, váltóáramú átalakítás)

PEM tüzelőanyag-cella

Technológiai összefoglaló



Működés

A PEM tüzelőanyag-cellában egy protoncserélő membrán (szilárd polimer) hidratált állapotában átveszi az anód oldalán a hidrogénből keletkező ionokat, miközben az elektronok egy külső áramkörbe kényszerülnek. A katód oldalán az elektronok a beáramló oxigénnel és a hidrogén ionokkal egyesülve vizet alkotnak.

- Elektrokémiai folyamat**
- **Elektrolit:** Peflour-szulfonsav ionátvesztő membrán
 - **Vezetőképes ion:** H^+
 - **Üzemanyag:** H_2 , metanol (CH_3OH)
 - **Oxidáns anyag:** Levegő
 - **Katalizátor:** Platina / Ruténium

Technológiai érettség

TRL 9



Hőmérséklet

- 40 – 90 °C

Élettartam

60.000 óra

Hatékonyság

43 – 68 %

Tipikus stack-méret

< 1 kW – 100 kW

Hidrogénigény

0,025 – 0,05 kg H_2 / kWh

Tipikus teljesítmény

0,5 – 400 kW

Indítási idő

1 – 5 perc

Alkalmazási területek

- Járműipar, közlekedés (közúti, hajó, vonat)
- Szünetmentes és szigetüzemű energiaellátás
- Hordozható tápellátás
- Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés

Előnyök

- Többszöri és gyors be- és kikapcsolással működtethető
- Magas teljesítménysűrűség
- Részleges terhelések esetén is magas hatékonyság
- Alacsony működési hőmérséklet
- Költségcsökkenési potenciál a tömeggyártás felskálázódásával

Korlátok

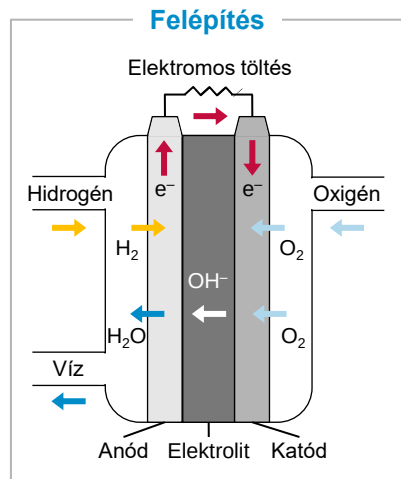
- Magas tisztaságú hidrogént igényel, mert a katalizátor érzékeny a szennyeződésekre
- Membrán ideális nedvességének biztosítása komplex feladat
- Drága katalizátort igényel

Alkalmazás VE-rendszerben

Szabályozásban és kiegyensúlyozásban használható, mivel különösen alkalmas változó terhelések kezelésére

Alkáli tüzelőanyag-cella

Technológiai összefoglaló



Működés

Az alkális tüzelőanyag-cellában valamilyen lúgos oldat található. Ebben hidroxidionok mozognak a katódtól az anód felé haladva, majd hidrogénionokkal reagálva vizet és elektronokat hoznak létre. Az elektronok egy külső áramkörön keresztül érkeznek vissza a katódra. Az elsőként kifejlesztett tüzelőanyag-cella típusok közé tartozik.

- Elektrokémiai folyamat**
- **Elektrolit anyaga:** KOH (kálium-hidroxid), NaOH
 - **Vezetőképes ion:** OH^-
 - **Üzemanyag:** H_2
 - **Oxidáns anyag:** O_2
 - **Katalizátor:** Platina / Ruténium

Technológiai érettség

TRL 6-7



Hőmérséklet

65 – 220 °C

Élettartam

5000 – 8000 óra

Hatékonyság

60 – 70 %

Tipikus stack-méret

< 1 kW – 100 kW

Hidrogénigény

0,035 – 0,05 kg H_2 / kWh

Tipikus teljesítmény

250 kW

Indítási idő

5 – 15 perc

Alkalmazási területek

- Űripar, rakétameghajtás
- Kevés, többnyire speciális alkalmazási terület (hadiipar, tengeralttjárók)

Alkalmazás VE-rendszerben

Nem javasolt az alacsony élettartam és relatíve kis méret miatt

Előnyök

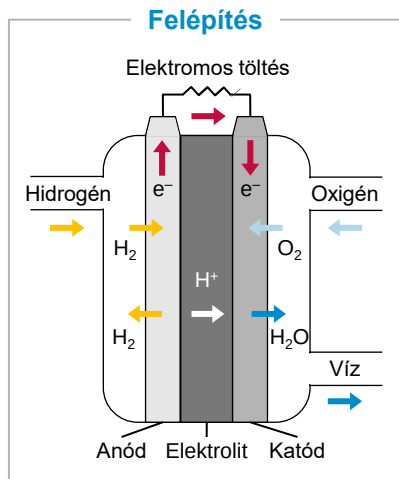
- Magas hatékonyság
- Alacsony költségű komponensek
- Viszonylag gyors bekapcsolás

Korlátok

- Magas tisztaságú H_2 üzemanyagot és O_2 oxidáns anyagot igényel, mert CO_2 szennyeződésre különösen érzékeny
- Különösen alacsony élettartam

Foszforsavas tüzelőanyag-cella

Technológiai összefoglaló



Működés

A cellában az ionvezető közeg foszforsav, mely magas hőmérsékleten válik áteresztővé. Az anód oldalon a hidrogén elektronokra és ionokra bomlik, előbbi külső áramkörön, utóbbi az ionáteresztő közegek keresztül éri el a katód oldalt, ahol oxigénnel egyesülve vizet alkotnak. Ez a típus került elsőként kereskedelmi forgalomba.

Elektrokémiai folyamat

- **Elektrolit:** Foszforsav (H_3PO_4)
- **Vezetőképes ion:** H^+
- **Üzemanyag:** H_2 , metán, szintézisgáz, biogáz, metanol
- **Oxidáns anyag:** Levegő
- **Katalizátor:** Platina

Technológiai érettség

TRL 8



Hőmérséklet

150 – 200 °C

Élettartam

30.000 – 60.000 óra

Hatékonyság

40 – 55 %
(kapcsolt termelés: 85 %)

Tipikus stack-méret

5 – 400 kW

Hidrogénigény

0,035 – 0,06 kg H_2 / kWh

Tipikus teljesítmény

MW

Indítási idő

10 – 30 perc

Alkalmazási területek

- Elosztott energiatermelés
- Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés

Alkalmazás VE-rendszerben

Kisebb, telepített energia termelőként használható a hálózati stabilitás biztosítására, alkalmazásuk nem elterjed

Előnyök

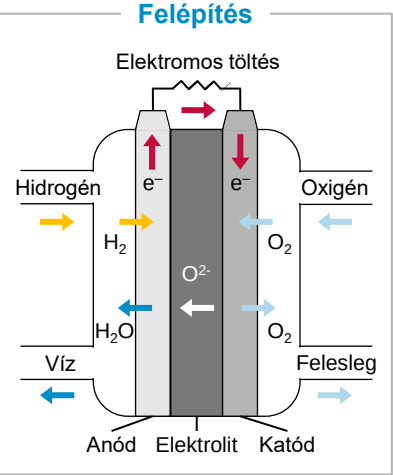
- Viszonylag széles teljesítménytartomány
- Magas hatékonyság érhető el a megtermelt hő hasznosításával

Korlátok

- Alacsony teljesítménysűrűség
- Terhelés változtathatósága viszonylag lassú
- Viszonylag alacsony költségcsökkenési potenciál

Szilárd-oxidos tüzelőanyag-cella

Technológiai összefoglaló



Működés

Az SO tüzelőanyag-cellában szilárd, porózus kerámia anyag található, mely magas hőmérsékleten lehetővé teszi a katód oldalon elektronok felvételével létrejövő oxigénionok áramlását. Ezek az anód oldalon keletkező hidrogénionokkal egyesülve vizet alkotnak, az elektronok külső áramkörön keresztül jutnak vissza.

- Elektrokémiai folyamat**
- **Elektrolit:** Szilárd, porózus kerámia anyag: Y₂O₃-ZrO₂
 - **Vezetőképes ion:** O(2⁻)
 - **Üzemanyag:** H₂, metán, szintézisgáz, biogáz, metanol
 - **Oxidáns anyag:** Levegő
 - **Katalizátor:** Nikkel

Technológiai érettség

TRL 8

Hőmérséklet

500 – 1000 °C

Élettartam

90.000 óra

Hatékonyság

55 – 65 %
(kapcsolt termelés: 90 %)

Tipikus stack-méret

1 – 2000 kW

Hidrogénigény

0,05 – 0,06 kg H₂ / kWh

Tipikus teljesítmény

kW – MW

Indítási idő

1 – 4 óra

- Alkalmazási területek**
- Erőművi energiatermelés
 - Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés
 - Ipari hőtermelés

Alkalmazás VE-rendszerben

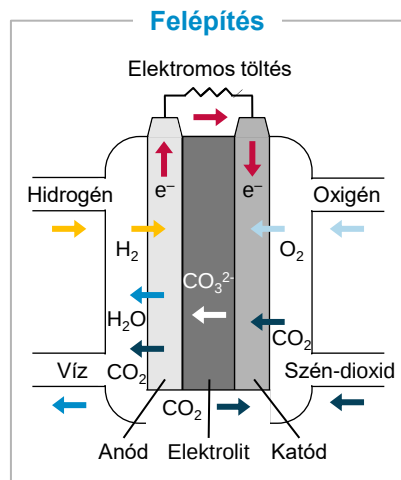
Ideális telepített erőművi alkalmazásra és szigetüzemű energiatermelésben is, széles teljesítménytartományban

- Előnyök**
- Magas hatékonyság és széles teljesítménytartomány
 - Olcsó, könnyen hozzáférhető katalizátor
 - Input anyagok tisztaságára kevésbé érzékeny
 - Többféle hidrogén tartalmú üzemanyaggal működtethető
 - Hosszú élettartam

- Korlátok**
- Terhelés változtathatósága lassú
 - Magas hőmérsékletet elviselő anyagokat igényel
 - Korlátozott be- és kikapcsolási ciklusok

Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella

Technológiai összefoglaló



Működés

A cellában karbonát sók találhatók, melyek magas hőmérséklet hatására megolvadnak és ionáteresztővé válnak. A katód oldalon létrejövő karbonátionok az anód oldalon hidrogénnel egyesülve vizet, szén-dioxidot és elektronokat hoznak létre. Az elektronok egy külső áramkörön keresztül érkeznek vissza a katódra.

- Elektrokémiai folyamat**
- **Elektrolit:** Olvadt lítium-, nátrium-, / kálium-karbonátok
 - **Vezetőképes ion:** CO_3^{2-}
 - **Üzemanyag:** H_2 , metán, szintézisgáz, biogáz, metanol
 - **Oxidáns anyag:** Levegő
 - **Katalizátor:** Nikkel-oxid (NiO)

Technológiai érettség

TRL 8



Hőmérséklet

600 – 700 °C

Élettartam

20.000 – 40.000 óra

Hatékonyság

55 – 65 %
(kapcsolt termelés: 85 %)

Tipikus stack-méret

300 – 3000 kW

Hidrogénigény

0,05 – 0,06 kg H_2 / kWh

Tipikus teljesítmény

kW – MW

Indítási idő

0,5 – 2 óra

Alkalmazási területek

- Erőművi energiatermelés (zsinór)
- Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés
- Ipari hőtermelés

Előnyök

- Magas hatékonyság
- Olcsó és egyszerűen hozzáférhető katalizátor
- Input anyagok tisztaságára kevésbé érzékeny
- Többféle hidrogén tartalmú üzemanyaggal működtethető

Korlátok

- Terhelés változtathatósága lassú
- Magas hőmérsékletet elviselő anyagokat igényel
- Alacsony teljesítménysűrűség
- Komplex tervezési követelmények
- Komplex üzemi egyensúlyi követelmények

Alkalmazás VE-rendszerben

Ideális telepített erőművi alkalmazásra (zsinórtermelés)

Intenzív kutatás-fejlesztési tevékenység zajlik a tüzelőanyag-cella költségek csökkentése és a működési hatékonyság növelése céljából

Fejlesztési irányok	Leírás
 Költségek csökkentése	▪ Alacsony költségű stack komponensek és üzemegyensúlyi (balance of plant, BOP) berendezések kifejlesztése (pl. platina katalizátorok helyettesítése) ▪ Fejlett, nagy volumenű gyártási folyamatok kialakítása
 Teljesítmény növelése	▪ Innovatív anyagok kifejlesztése (pl. új elektrolit membránok kialakítása, membrán-elektród együttes fejlesztése, üzemegyensúlyi komponensek veszteségeinek csökkentése) ▪ Komponensek integrációjának fejlesztése
 Élettartam növelése	▪ A tüzelőanyag-cella degradációját okozó mechanizmusok azonosítása, ezek hatásainak mérséklése új anyagok kifejlesztésével és kezelési stratégiák kidolgozásával ▪ Villamosenergia-rendszerbeli alkalmazásoknál cél a 80 ezer órás élettartam elérése valós működési körülmények között (leállítási-indítási ciklusok, változó terhelések, stb.)
 Energiasűrűség növelése	▪ Kisméretű, kompakt tüzelőanyag-cella elemek kifejlesztése innovatív anyagok és struktúrák, szerkezeti kialakítás alkalmazásával ▪ Fejlett üzemegyensúlyi komponensek és kiegészítő rendszerek alkalmazása
 Hatékony ellátási lánc	▪ Alapanyagok hozzáférhetőségének fejlesztése ▪ Rendszer- és stack-elemek újrahasznosítási lehetőségeinek fejlesztése ▪ Moduláris rendszerek kialakítása és sztenderdizálás

Hazánkban rövid távon a PEM, később akár az SO és MC tüzelőanyag cellák elterjedése várható a VE-rendszerbeli alkalmazásoknál

	PEM tüzelőanyag-cella	Szolid-oxidos tüzelőanyag-cella	Olvadék-karbonátos tüzelőanyag-cella
VE-rendszer alkalmazás	Szabályozásban és kiegyensúlyozásban használható	Ideális telepített erőművi alkalmazásra és szigetüzemű energiatermelésre	Ideális telepített erőművi alkalmazásra (zsinórtermelés)
TRL	TRL 9 	TRL 8 	TRL 8 
Tipikus teljesítmény	0,5 – 400 kW	kW – MW	kW – MW
Indítási idő	1 – 5 perc	1 – 4 óra	0,5 – 2 óra
Hidrogénigény	0,025 – 05 kg H ₂ / kWh	0,05 – 0,06 kg H ₂ / kWh	0,05 – 0,06 kg H ₂ / kWh
Energetikai hatékonyság	43 – 68 %	55 – 65 % (kapcsolt termelés: 90 %)	55 – 65 % (kapcsolt termelés: 85 %)
Hazai potenciál	Magas, rövid távon alkalmazható is alkalmazható és viszonylag ismert technológia	Közép és hosszú távon alkalmazható, további tapasztalatszerzés szükséges	Közép és hosszú távon alkalmazható, további tapasztalatszerzés szükséges

Milyen előnyökkel jár a hidrogén gázerőművi hasznosítása?

Előnyök

Leírás



Meglévő gáz-infrastruktúra hasznosítása

- A már meglévő, kiterjedt hazai gázinfrastruktúra nagymértékben hasznosítható, nem szükséges költséges, új infrastruktúrát kiépíteni más technológiára.



Ismert, jól bevált technológia

- A gázerőművi energiatermelés egy jól bevált technológia, amiben nagy tapasztalat, szakértelem, kiépült gyártói és szervizhálózat áll rendelkezésre Magyarországon és Európában.



Skálázható technológia

- A gázerőművi energiatermelési technológia jól skálázható. Alkalmazható kisméretben (kW méretben) vagy akár nagy, többszáz MW-os kapacitásban is. Ez jelentős előny más karbonmentes technológiákhoz képest.



Akár 100%-os kibocsátás-csökkentés

- Hidrogén gázerőművi égetésével elérhető a 0 kibocsátású energiatermelés. Már létezik olyan technológia, ami az NO_x kibocsátást képes csökkenteni. Itt még jelentős fejlődés várható a következő évtizedben.

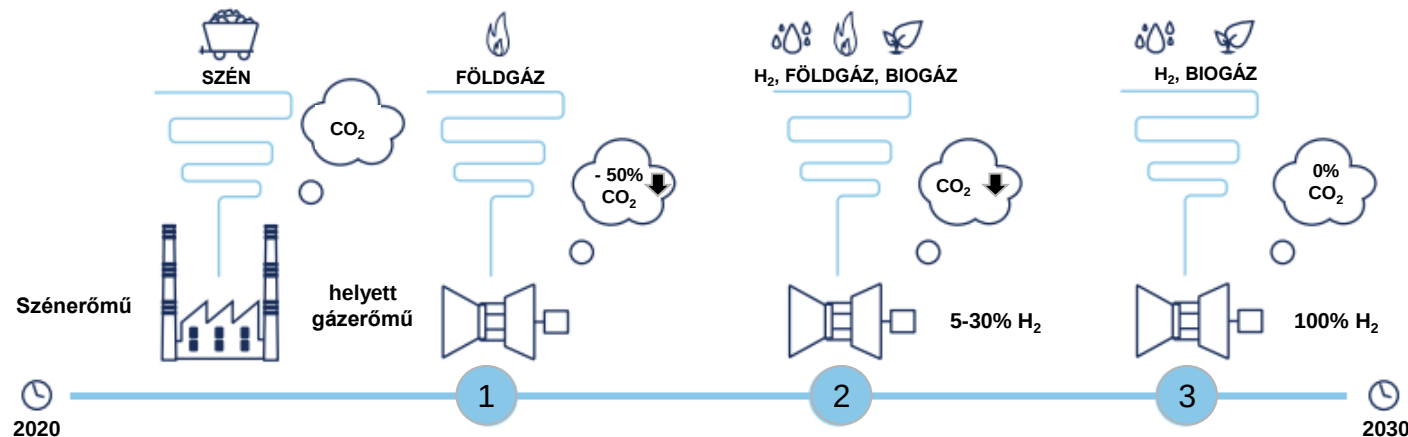


Gyorsítja a megújulók terjedését

- A megújulóenergia alapú kapacitások terjedése rugalmas kapacitásokkal vagy nagy volumenű energiátárolással tud párhuzamosan fejlődni. A meglévő gázerőművi infrastruktúra hasznosítása révén ez gyors ütemben meg tud valósulni és ezáltal gyorsítani a megújulók terjedését.

A gázerőművi alkalmazásokban eleinte a hidrogén földgázhoz keverése várható, a 100% hidrogén üzem csak később terjed el

Gázturbinák szerepe az energiaátmenetben - Hidrogén gázerőművi felhasználásának várható mértéke a következő években



1 Szénerőművekről CCGT gázturbinákra való áttérés jelentősen csökkenti a kibocsátást (akár 50%-al is)

2 Megújuló gázok (hidrogén, biogáz) földgázhoz való keverése és együttes égetése a gázturbinákban: eleinte csak kis mértékben (5-30%)

3 Kizárólag megújuló gázok (hidrogén, biogáz) égetése a gázturbinákban (földgáz nélkül): 100%

A hidrogén energetikai és égési tulajdonságai eltérnek a földgázétól, mely meghatározó a gázturbinák hidrogén üzemű működése kapcsán

FÖLDGÁZ vs. HIDROGÉN: a legfontosabb különbségek a környezeti tulajdonságaikban

ENERGIASŰRŰSÉG	LÁNGHŐMÉRSÉKLET	LÁNGTERJEDÉSI SEBESSÉG
- A hidrogén energiasűrűsége alacsony, 3-ad akkora, mint a földgázé: - H₂: 10,05 kJ/m³ - CH₄: 32,56 kJ/m³ - Ez azt jelenti, hogy térfogatarányosan kevesebb energiát tartalmaz, mint a földgáz. - Hidrogén alkalmazásnál növelni kell a turbinaméretet vagy magasabb nyomást alkalmazni annak az érdekében, hogy azonos teljesítményen működjön, mintha tisztán csak földgázzal működne.	- A hidrogén adiabatikus lánghőmérséklete magasabb, mint a földgázé - H₂: 2 254 °C - CH₄: 1 963 °C - Ennek jelentős hatása van a gázturbina működésére: - a turbina bizonyos érintett részei jelentősen magasabb hőmérsékletnek lesznek kitéve, így extra hűtést igényelnek; - magasabb NO_x kibocsátás; - a magas hőmérséklet nyomásingadozást okozhat, mely közvetve károsíthatja a turbina tüzelőberendezését.	- A hidrogén lángterjedési sebessége jelentősen magasabb a földgázénál - H₂: 3 m/s - CH₄: 0,3 m/s - A földgáztüzelésű turbinák a földgáz lángterjedési sebességére vannak beállítva, ezért hidrogén bekeverés esetén több biztonsági kockázat is felmerül. - Magasabb lángsebesség esetén a reakció (égés) visszafelé is terjedhet, tehát a keverőkört, injektorokat károsíthatja, vagy akár robbanást is okozhat.

A hidrogén bekeverés és tiszta égetés műszaki kihívásainak kezelésére jelentős kutatás-fejlesztési tevékenység zajlik

Energiaátmeneti kihívás

Tüzelőanyag-rugalmasság

- Az energiaátmenet időszakában olyan gázturbinákra van szükség, melyek **képesek működni a hidrogén és egyéb gázok** – többnyire földgáz – **különböző részarányú keverékeivel**, illetve **elviselik a tüzelőanyag mix összetételének gyors változását**.
- A **magas H₂ bekeverési arányra képes gázturbinák jelenleg kutatás-fejlesztési szakaszban vannak**, kevés az elérhető műszaki megoldás és a működő kereskedelmi léptékű demonstrációs projekt.
- Ígéretes a **száraz, alacsony NO_x-kibocsátású technológia**, mely alkalmas lehet 0-100% hidrogén bekeverésre, azonban további fejlesztés szükséges a magas H₂ tartalom miatt felmerülő műszaki kihívások kezelésére.

Magas H₂ arány műszaki kihívásai

Öngyulladás

- Magasabb az öngyulladás kockázata a hidrogén reakciókészsége (alacsonyabb gyújtás késleltetési idő) miatt.
- Kezelése jelenleg bonyolult és költséges égő konstrukciókat igényel.

Lángvisszacsapás

- Magas lángvisszacsapási kockázat a magasabb lángsebesség és alacsonyabb gyújtás késleltetési idő miatt.
- Kezelésére felismerési és kezelési módszerek, technológiák kifejlesztése szükséges.

Termoakusztika

- A H₂ égése eltérő termoakusztikai (hő hatására bekövetkező hanghatás, rezgés) viselkedéssel jár, mely növeli a veszélyes vagy roncsoló nemkívánatos jelenségek bekövetkezésének valószínűségét.
- Megbízható monitoring és irányítási rendszerek kialakítása szükséges.

Magasabb NO_x kibocsátás

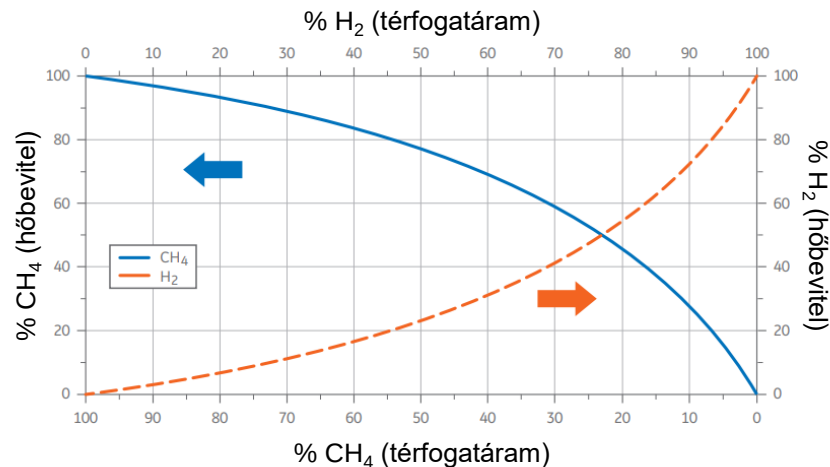
- Magasabb NO_x a H₂ magasabb adiabatikus lánghőmérséklete miatt, a jelenleg érvényben lévő határértékek betartása különös kihívást jelent.
- Száraz, alacsony NO_x-kibocsátású technológiák továbbfejlesztése és az alkalmazhatóságuk növelése szükséges.

További kihívások

- A H₂ alacsonyabb Wobbe-száma miatt nagyobb térfogati áramlási sebesség szükséges ugyanazon bemenő hőérték biztosításához.
- Az égéstermék magas nedvességtartalma korrózióhoz és a nagyobb hőátadás miatt túlmelegedéshez vezethet, ami az élettartam csökkenésével jár.

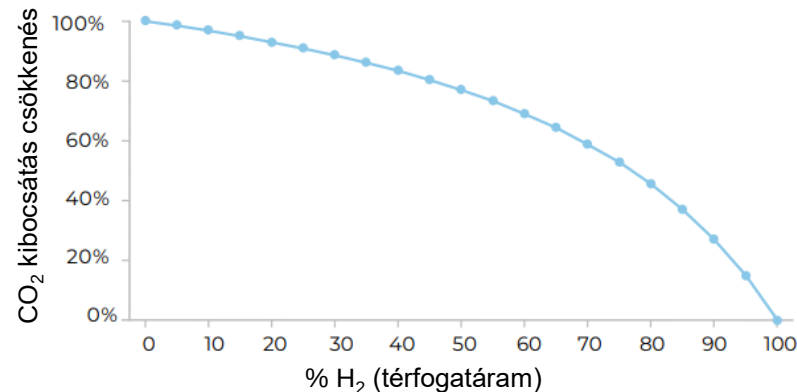
Jelentős H₂ bekeverési arány elérése szükséges érdemi CO₂ kibocsátás csökkentéshez, a H₂ alacsony térfogati energiasűrűsége miatt

— Hőbevitel (tömegáram) és térfogatáram kapcsolata —



- A tüzelőanyag-mix hőbevitelének és a bekevert hidrogén térfogataránya közötti kapcsolat nem lineáris, mivel a H₂ térfogati energiasűrűsége jelentősen kisebb a metánénál. A hőbevitel szerinti H₂ arány mindig kisebb a térfogat szerinti H₂ aránynál.
- A gázturbina azonos hőbevitelt igényelnek, így a tüzelőanyag 5% H₂ és 95% CH₄ térfogatarányos keverékre váltása esetén a hidrogén csupán a hőbevitel 0,65%-át adja.

— H₂ bekeverés és CO₂ kibocsátás csökkenés kapcsolata —



- A CO₂ kibocsátás mértékében a tüzelőanyag-keverék hőbevitelének a meghatározó.
- A H₂ bekeverési arány és a CO₂ kibocsátás csökkenés között nem lineáris a kapcsolat, **szignifikáns kibocsátás csökkenés eléréséhez jelentős térfogatarányos H₂ bekeverés szükséges.**
- A tüzelőanyag 5% H₂ és 95% CH₄ térfogatarányos keverékre váltása esetén a CO₂ kibocsátás csökkenés mértéke ~1,5%.

A meglévő gázturbinák egyedi vizsgálata szükséges a hidrogéntartalmú tüzelőanyagú működésre történő átalakításához

Minden gázturbinát egyedileg szükséges vizsgálni a hidrogéntartalmú üzemanyaggal történő működés szempontjából, figyelembe véve a tervezett hidrogénszintet és a meglévő előkezelési-, égetési- és vezérlési rendszereket.

Alacsony hidrogénszint: 0-10 vol%

Nem igényel átalakítást az anyagok és felépítés, a vezérlés és a biztonsági berendezések tekintetében.

Közepes hidrogénszint: 10-30 vol%

Kisebb, nem jelentős átalakítást igényel az anyagok és felépítés, a vezérlés és a biztonsági berendezések tekintetében.

Magasabb hidrogénszintek: 30-100 vol%

Jelentős átalakítást igényel a tüzelőanyag bejuttatás, az égési modul, a vezérlés és a biztonsági intézkedések tekintetében is.

Aktív kutatási tevékenység zajlik a meglévő gázturbinák hidrogénüzemű átalakítása kapcsán, **elsősorban egyedi gázturbina modellek mentén.** Az alacsonyabb hidrogénszintek esetén jelentős gyakorlati tapasztalat áll rendelkezésre az egyes gázturbinák működéséről, míg a magas hidrogénszintek esetén számottevően kevesebb az elérhető ismeret.



Gázturbina átalakítása (retrofit) csomagok tartalma

- A széles körben alkalmazott, nem egyedi tervezésű gázturbinák esetén a hidrogénüzemű átalakítás várhatóan egy meghatározott átalakítási csomag vagy új modul beszerzésével valósulhat meg.
- Utólagos gázturbina átalakítást várhatóan a nagy közüzemi szolgáltatók és finomítók végeznek.
- **Átalakítási csomag valószínű tartalma:**

1

Égési modul cseréje

2

Műszerezés és üzemanyag-vezérlő rendszer módosítása

3

Üzem tüzelőanyag-ellátó rendszerének átalakítása

4

Forró gázút kialakítás és komponensek felülvizsgálata

A hidrogén gázturbinákban való felhasználása lehetséges, de az ehhez szükséges módosítások hatással lehetnek a teljesítményre

A gázturbinák hidrogéntartalmú üzemanyagáramra történő átalakítása során számos tényezőre kell figyelni, ami a hidrogén földgáztól eltérő fizikai tulajdonságaiból adódik.



Tüzelőanyag előkezelés

- Fontos a **megfelelő szállítási nyomás** és **hőmérséklet figyelembe** vétele.
- Gázturbináknál a **csöveket és szelepeket át kell alakítani**, ideértve új szelepek tervezését és különböző tömítőrendszerek alkalmazását.
- A tüzelőanyag előmelegítése magas hőmérsékletet eredményezhet, ami **hidrogénmigrációt** okozhat.
- Fontos a **hidrogén megfelelő kiürítése a rendszerből**, mivel robbanásveszélyt okozhat karbantartás vagy javítás közben.



Tüzelőanyag-rugalmasság

- Kulcsfontosságú a **tüzelőanyag-összetétel** (földgáz/hidrogén) **változási ütemének kezelése**.
- Előnyös **ugyanazt a tüzelőanyagot használni** mind az indításhoz, mind a normál működéshez.
- Ha a keverés vagy tárolás nem megvalósítható, akkor a **tüzelőanyagösszetétel gyorsabb elemzését be kell építeni a gázturbina vezérlőrendszerekbe** annak érdekében, hogy alkalmazkodni lehessen a változó hidrogénszintekhez.

Forró gázút komponensek élettartama

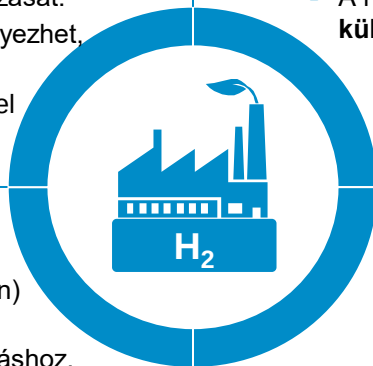


- A hidrogén-kompatibilis égőrendszerrel történő áttérés valószínűleg **megváltoztatja a forró gázút hőmérsékleti profiljait**.
 - A hőmérsékleti változások mértéke **minden motor típusra különböző**, nem általánosítható.
 - Az átépítéseknek új termék bevezetéséhez **hasonló minősítésen kell átesniük**, a kulcsfontosságú komponensekre összpontosítva.

Teljesítmény és rugalmasság

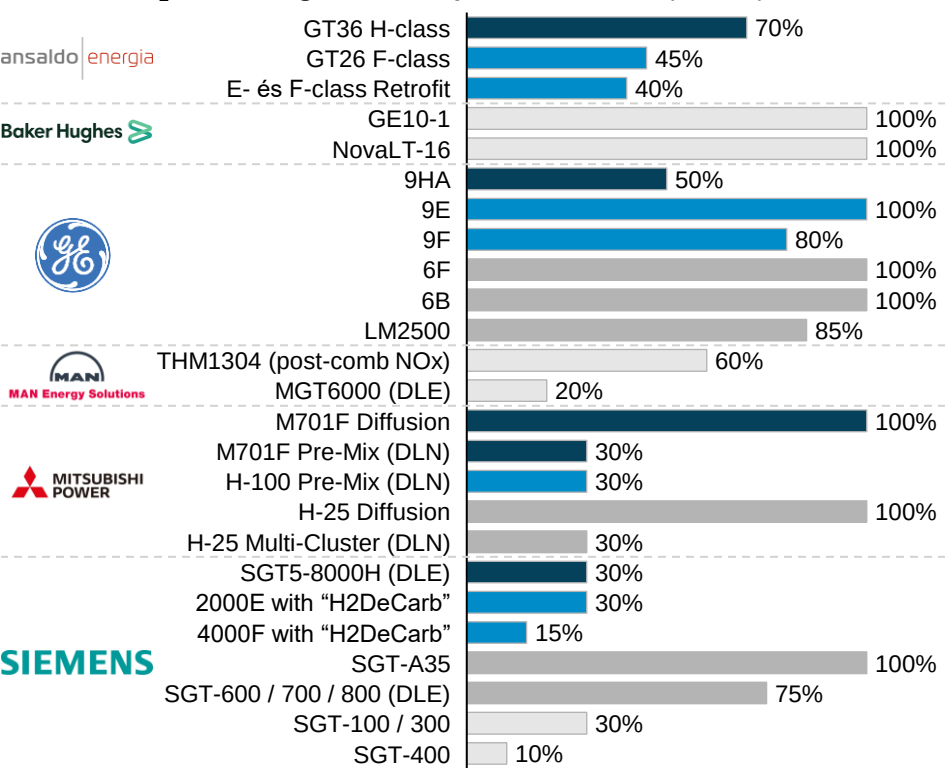


- Gázturbinák **teljesítménye stabil marad a hidrogén üzem esetén**, így jelentős teljesítményvesztés nélkül lehetséges a földgázról történő áttérés.
- Új égési és befecskendezési tervek szükségesek** a hidrogén megnövekedett reakcióképessége és a nagyobb lángsebesség miatt.
- Kihívást jelenthet a **magas földgáztüzelési sebesség fenntartása**.
- A magasabb hidrogéntartalom **növelheti alacsony kibocsátású működési tartományt** a CO-kibocsátás csökkentésén keresztül.



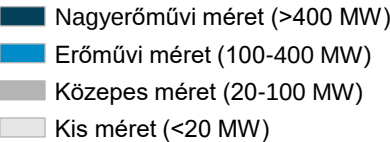
A H₂-turbinák piaca folyamatosan bővül, elérhetőek megoldások alaperőművi és szabályozási, kiegyensúlyozási alkalmazásokra is

H₂-alkalmas gázturbinák piaci áttekintése (kivonat)



H₂-alkalmas gázturbinák és gyártók helyzete

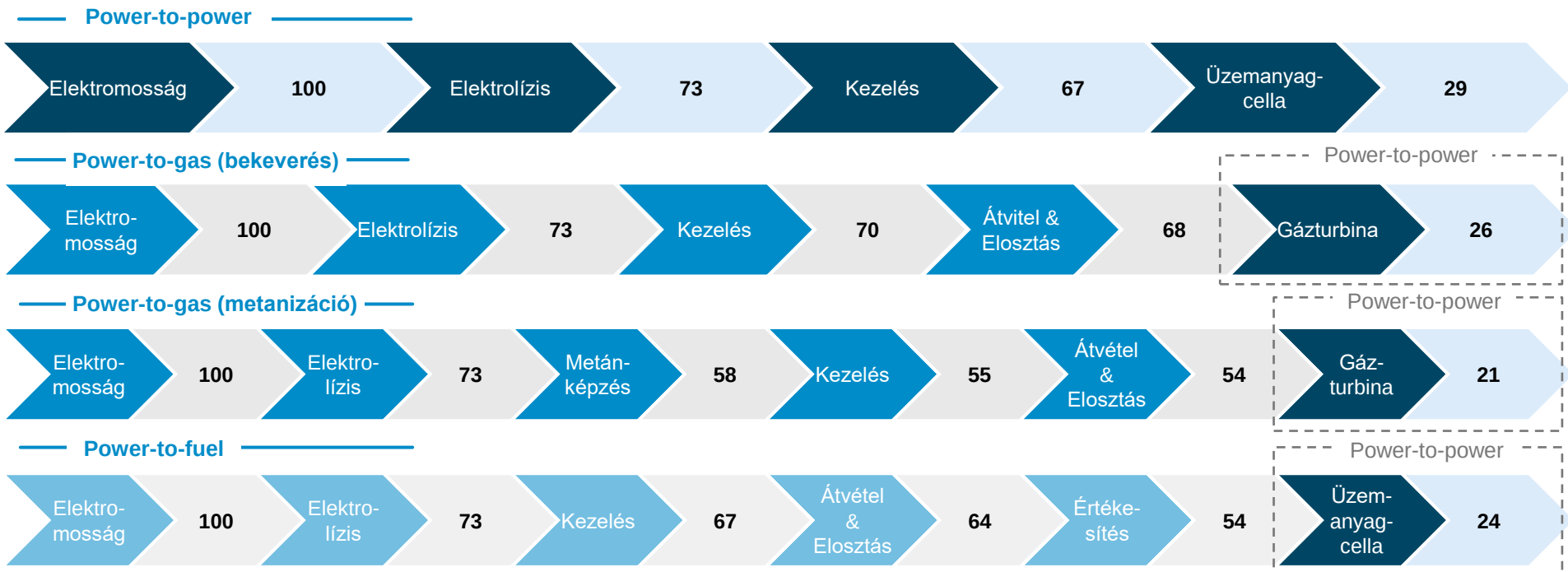
- Számos H₂-égetésre alkalmas gázturbina érhető el a piacon jelenleg is, köztük a villamosenergia-rendszerben alkalmazható változatok is.
- **Alaperőművi és szabályozási, kiegyensúlyozási célra alkalmazható H₂-turbinák is elérhetőek.**
- A legtöbb gázturbina gyártó foglalkozik a meglévő termékeik H₂-bekeverésre alkalmassá tételével (retrofit csomagok) és új, H₂-égetésre alkalmas, alacsony NO_x-kibocsátású termékek fejlesztésével.
- A világ három legnagyobb gázturbina gyártója a **General Electric**, a **Siemens** és a **Mitsubishi Power**, mind jelentős H₂-égetésre alkalmas gázturbina portfólióval rendelkeznek, amit aktívan fejlesztenek és bővítenek.
- További jelentős szereplők az Ansaldo Energia, a Baker Hughes és a MAN Energy Solutions, melyek szintén élenjárók a H₂-égetésre alkalmas gázturbinák gyártásában és fejlesztésében.



H2 technológiák integrációja a villamosenergia-rendszerbe



A különböző hidrogén-alapú villamosenergia-termelés integrációs útvonalak jelenlegi átalakítási hatékonyságai



*A számok a hasznos energiát jelölik

A hidrogén-alapú rendszerek segítik kihasználni a többlet elektromosságot, de minél több átalakítási lépés van, annál alacsonyabb az összhatékonyság. A power-to-power magasabb hatékonyságot kínál, de a meglévő tárolási és terjesztési infrastruktúra felhasználásának lehetősége miatt a power-to-gas előnyösebb rövid távon.

Nemzetközi tapasztalatok



Hidrogénalapú villamosenergia-termeléssel foglalkozó nemzetközi projektek alapján gyakorlati tapasztalatok fogalmazhatók meg



Hidrogén előállítása elektrolizálóval és saját megújuló energia termeléssel

A bemutatott projektekben időjárásfüggő megújuló energiaforrásokkal, szél- és naperőművekkel létrehozott villamos energiával dolgoztak, melyekből elektrolizálóval állítottak elő hidrogént.



Rövid és hosszú távú tárolást egyaránt alkalmaztak

Tizenöt projekt került vizsgálatra, melyekből hét projekt kizárólag sűrített gáz, hat projekt kizárólag fém-hidrid, míg két projekt mindkét tárolási megoldás kombinációját alkalmazta energiatárolás céljából, ezeket sok esetben további rövid távú energiatárolási megoldással (pl. akkumulátor, lendkerék, szuperkondenzátor) egészítették ki.



Hibrid tárolási rendszerek bizonyultak legjobbnak

Műszaki szempontból a legjobb megoldást a hibrid rendszerek jelentik, amelyekben a hidrogént további rövid távú energiatárolási technológiákkal, például akkumulátorokkal és szuperkondenzátorokkal kombinálják.



Tárolási technológiák előnyei ötvözhetők

Az egyes tárolási technológiák előnyeinek teljeskörű kihasználásához és a legmagasabb hatékonyság eléréséhez a rendszer működési környezetének felmérése és testre szabása szükséges.



Vezérlőrendszerek kiemelt fontosságúak

A vezérlőrendszerek és az energiagazdálkodási stratégiák fontos tényezők az optimális eredmények eléréséhez, mind a hatékonyság, mind a költségek tekintetében.

Energiepark Mainz, Németország

Nagy méretű erőmű projekt összefoglaló

Leírás

- A teljes méretű power-to-gas erőművet a helyi elektromos hálózat támogatására és az elektrolizáló nagyüzemi alkalmazhatóságát vizsgáló kutatás céljából építették.
- A létesítmény egy 8 MW-os szélenergia-parkhoz kapcsolódik, és az aktuálisan fel nem használt szélenergiát hidrogén előállítására használja, majd sűríti és tartályban tárolja. A tartályokból a hidrogént vagy a földgázhálózatba fecskendezik, vagy tovább sűrítik.
- A hidrogént bekeverik a földgázhálózatba, reakcióanyagként a vegyiparban használják, vagy hidrogéntöltő állomásoknak értékesítik.

Megvalósítók

- Rhein-Main University of Applied Sciences
- Linde AG
- Siemens AG
- Mainzer Stadtwerke AG

Alkalmazott technológia

- 8 MW szélenergia-park
- Három 6 MW-os PEM elektrolizáló
- 80 baron földgázhálózatba keverés vagy 225 baron sűrített gázként tárolás

Főbb tanulságok

- Az elektrolizálók hatásfoka gyorsan növekszik a maximális értékig, amikor a teljesítmény 1 MW körül van, majd a hatásfok lassan csökken a teljesítmény növekedésével.
- A hidrogéntermelés mértéke növekszik a teljesítmény növekedésével, ám az elektrolizálók csak 15 percig képesek csúcsteljesítményen működni, míg a névleges teljesítményen folyamatosan.
- Az egész létesítmény kombinált hatékonysága 54-60% körül alakult, beleértve az összes kapcsolódó berendezést.

A projekt környezete



Sir Samuel Griffith Centre, Ausztrália

Nagy méretű erőmű projekt összefoglaló

Leírás

- A rendszert úgy tervezték, hogy az elektromos hálózattól függetlenül működjön, és üzem közben nulla szén-dioxid-kibocsátást termeljen.
- A központot napelem és fém-hidrid hidrogéntároló működteti.
- A gyengén napsütéses napokon a hidrogén felszabadulhat a tárolóból (a fém-hidridek felmelegítésével), és felhasználható villamos energia előállítására egy hidrogén üzemanyagcellában.
- A villamos energiát a tárolt hidrogénből két 30 kW-os (PEM) tüzelőanyag-cella állítja elő.

Megvalósítók

- Sir Samuel Griffith Centre, Griffith University in Brisbane

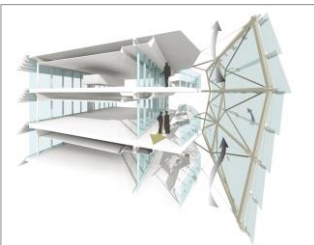
Alkalmazott technológia

- 376 kW napelem
- Lítium-ion akkumulátor
- 160 kW-os elektrolizáló
- 120 kg kapacitású fém-hidrid hidrogéntároló
- 30 kW PEM tüzelőanyag-cella

Főbb tanulságok

- Napsütéses napokon napelemek több mint elegendő áramot termelnek az épület áramellátásához, a többletenergiát lítium-ion akkumulátor tárolja.
- Az akkumulátorok teljes töltöttsége esetén a felesleges napenergia egy 160 kW-os elektrolizálót működtet, amely óránként 2,7 kg hidrogén előállítására képes.
- A hidrogént stabil formában, fém-hidridként tárolják. A tárolórendszer kapacitása 120 kg hidrogén, ami 2 MWh villamos energiának felel meg; és az átlagos fogyasztási arányok alapján több napos napsütés nélküli energiaellátást biztosít az épületben.

A projekt környezete



Az elmúlt években számos hálózatra kapcsolt, sűrített gáz tárolási technológiájú kísérleti méretű rendszer hatékonyságát vizsgálták (1/2)

Létesítmény létrehozója, helyszíne	Hálózati topológia	Tárolási technológia	Projekt célja	Eredmény
 Norsk Hydro Enercon	Hálózatra kapcsolt	Sűrített gáz	Egy 10 házból álló mikrohálózatban működő, teljes körű megújuló energiarendszer szélerőművel, elektrolizálóval, sűrített gáz hidrogéntárolóval, hidrogén motorral és üzemanyagcellával.	Az idő 50%-ában tudott önellátóan működni a rendszer, sokszor a hálózatról kellett energiát vételeznie, hogy a hidrogéntartályban megfelelő nyomás tudjon fennmaradni.
 National Fuel Cell Research Center (University of California)	Hálózatra kapcsolt	Sűrített gáz	A hidrogén energiátárolásként való felhasználásának értékelése lakossági alkalmazásokban 5 kW PV rendszerrel, elektrolizálóval, sűrített gáz hidrogéntárolóval, hidrogén üzemanyagcellával, akkumulátorral.	- Az energiatermelés és felhasználás időbeliségében való különbség miatt a tárolóra szükség volt. - Az elektrolizáló működéséhez szükséges belső nyomás csak tiszta időben volt meg, hosszabb felhős periódusok esetén a hidrogéntermelés leállt.

Az elmúlt években számos hálózatra kapcsolt, sűrített gáz tárolási technológiájú kísérleti méretű rendszer hatékonyságát vizsgálták (2/2)

Létesítmény létrehozója, helyszíne	Hálózati topológia	Tárolási technológia	Projekt célja	Eredmény
 University of Bari	Hálózatra kapcsolt	Sűrített gáz	Üvegházak fűtésére használt megújuló energiarendszer PV rendszerrel, hőszivattyúval, elektrolizálóval, sűrített gáz hidrogéntárolóval, hidrogén üzemanyagcellával és akkumulátorral.	- Az elektrolizáló a 2,5 kW névleges teljesítményének 20%-ának megfelelő minimális teljesítményt igényelt a hidrogén előállításához, ez alatt nem működött. - A rendszer bizonytalanul üzemelt, főként felhős napokon állt le. - Tiszta időben folyamatosan termelt, de nem volt stabil a termelés a napelemes termelés apróbb változásai miatt.
 Tohoku University Chiba University Három japán vállalat	Hálózatra kapcsolt	Fém-hidrid és sűrített gáz	Helyi mikrohálózat, amely a főhálózat kiesése esetén vészhelyzeti áramellátásként működhet, melynek része egy 20 kW PV rendszer, hibrid energiatároló, elektrolizáló, PEM üzemanyagcella, sűrített gáz és fém-hidrid hidrogéntároló.	- A PV-kondenzátor-hidrogén alapú rendszer megbízható megoldás vészhelyzeti áramellátásra, de hatékonysági- és költségproblémákkal jár. - Elektrolizáló átlagos hatásfoka 27%. Üzemanyagcella átlagos hatékonysága 29%. Teljes rendszer hatásfoka 23% volt. - Az elektrolizáló és a tüzelőanyag-cella alacsony és/vagy ingadozó teljesítményen működött, emiatt csökkent hatékonyság.

