

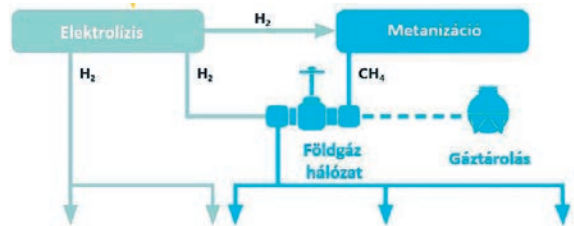
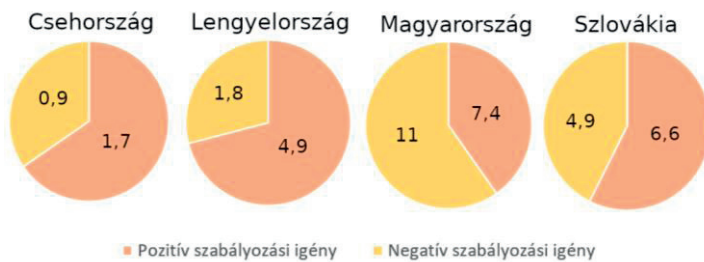
ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

63. évfolyam 2022. különszám

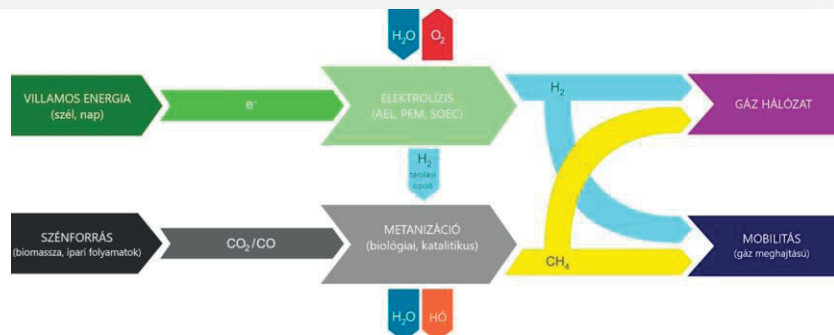
A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

III. Magyar Power-to-Gas Konferencia



P2G

2021



Energiatudományi
Kutatóközpont



Szabályzók



Komplex
állomások



Integrált üzem



Biomethan
H₂ integráció



Digitalizáció
Okosmérés



Okos földgáz
hálózat

Az energiaipar számára a megoldások teljes választékát biztosítjuk, kitermeléstől a felhasználásig

ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

63. évfolyam 2022. különszám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

Főszerkesztő:

Dr. Gróf Gyula

Vendégszerkesztő:

Dr. Imre Attila

Olvasó szerkesztő:

Dr. Groniewsky Axel

Szerkesztőség vezető:

Kaposvári Regina

Szerkesztőbizottság:

Dr. Balikó Sándor, Dr. Bihari Péter, Czinege Zoltán, Dr. Csűrök Tibor, Dr. Farkas István, Juhász Sándor, Korcsog György, Kövesdi Zsolt, Dr. Laza Tamás, Mezei Károly, Molnár Ferenc, PhD, Móczár Botond Máté, Dr. Nagy Valéria, Németh Bálint, Péter Szabó István, Romsics László, Dr. Serédiné Dr. Wopera Ágnes, Dr. Steier József, Dr. Stróbal Alajos, Szabó Benjámin István, Dr. Szilágyi Zsombor, Vancsó Tamás, Dr. Zsebik Albin

Honlap szerkesztő:

Kierblewski Marius

www.ete-net.hu

Kiadja:

Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület
1091 Budapest, Üllői út 25., IV. em. 420-421.
Tel.: +36 1 353 2751,
+36 1 353 2627,
E-mail: titkarsag@ete-net.hu

Felelős kiadó:

Bakács István, az ETE elnöke

A szerkesztőség címe:

BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
D épület 208 sz.
Telefon: +36 1 463 2613.
Telefax: +36 1 353 3894.

E-mail: eng@ete-net.hu

Megjelenik kéthavonta.

Előfizetési díj egy évre: 4200 Ft
Egy szám ára: 780 Ft

Előfizethető a díj átutalásával a 10200830-32310267-00000000 számlaszámra a postázási és számlázási cím megadásával, valamint az „Energiagazdálkodás” megjegyzéssel

ISSN 0021-0757

Tipográfia:

Büki Bt.
bukiantdras@t-online.hu

Nyomdai munkák:

EFO Nyomda
www.efonyomda.hu

Lapunkat rendszeresen
szemléli a megújult



www.observer.hu

TARTALOM • CONTENTS • INHALT

Dr. Birkner Zoltán:

A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia – merre tovább? 2
Power-to-Gas/Power-to-Methane technology – where to go next?
Power-to-Gas/Power-to-Methan-Technologie – wohin als nächstes?

Steiner Attila:

Az energiatárolás lehetséges fejlesztési irányai Magyarországon 3
The possible ways of R&D for energy storage in Hungary
Die möglichen Wege der F&E für die Energiespeicherung in Ungarn

Jászberényi Zoltán:

Biogáz termelés jövőbeni szerepe és lehetőségei az energiahatékonyság fokozása területén 6
Future role and opportunities of biogas production in the field of increasing energy efficiency
Zukünftige Rolle und Chancen der Biogaserzeugung im Bereich der Steigerung der Energieeffizienz

Csedő Zoltán:

A power-to-gas technológia ipari környezetben való tesztelése: egy szennyvíztisztító telepen szerzett K+F tapasztalatok 11
Testing the power-to-gas technology in commercial environment: R&D experiences from a wastewater treatment plant
Test der Power-to-Gas-Technologie im gewerblichen Umfeld: F&E-Erfahrungen aus einer Kläranlage

Pintér Gábor, Kondor Dóra, Hegedűsné Baranyai Nóra, Vincze András, Zsiborács Henrik: A power-to-gas technológia potenciális szerepe a visegrádi országok naperőműveinek menettrendtartásában 18
The potential role of power-to-gas technology in keeping the timetables of solar power plants in the Visegrad countries
Die potenzielle Rolle der Stromgastechologie in Übereinstimmung mit dem Zeitplan für Solarkraftwerke in den Visegrad-Ländern

Sinóros-Szabó Botond:

Alga biomasszából power-to-gas technológiával előállított biometanizációs folyamat műszaki feltételei 21
Technical Requirements of the Biomethanization Process produced from algae biomass using power-to-gas technology
Technische Anforderungen des Biomethanisierungsprozesses hergestellt aus Algenbiomasse mit Power-to-Gas-Technologie

Bai Attila, Gabnai Zoltán, Sertolli Ardit, Balogh Péter:

Biogázcélú algatermesztés és -felhasználás perspektívái hazánkban és Indiában 27
Perspectives in algae cultivation and use for biogas production in Hungary and in India
Perspektiven in der Algenzucht und -nutzung zur Biogasproduktion in Ungarn und Indien

Balogh Péter, Gabnai Zoltán, Czine Péter, Bai Attila: Módszertani alkalmazási lehetőségek az algatermesztés, a biogáz-előállítás és a PtG-technológia vizsgálata során 31
Methodological applications in algae cultivation, in biogas production and PtG technology
Methodische Anwendungen in der Algenzucht, in der Biogasproduktion und der PtG-Technologie

Kummer Kristóf, Imre Attila: Power-to-Methane alapú pseudo-akkumulátorok 35
Pseudo-batteries based on Power-to-Methane technology
Power-to-Methane-basierte Pseudo-Batterien

Groniewsky Axel, Kustán Réka, Imre Attila: Power-to-Methane technológia: műszaki összesség és esettanulmány 44
Power-to-Methane technology: technical summary and case study
Power-to-Methan-Technologie: Technische Zusammenfassung und Fallstudie

Csányi Szilvia, Zsiborács Henrik, Pintér Gábor, Hegedűsné Baranyai Nóra, Vincze András: A biogáz alapú Power-to-Gas technológia szerepe a magyarországi energiagazdálkodásban 55
The role of biogas-based Power-to-Gas technology in Hungarian energy management
Die Rolle der biogasbasierten Power-to-Gas-Technologie im ungarischen Energiemanagement

Zavarkó Máté: Az alga alapú power-to-gas üzemek fejlesztésének stratégiai szempontjai a körforgásos gazdaságban 60
Strategic aspects of developing algae-based power-to-gas plants in the circular economy
Strategische Aspekte der Entwicklung algenbasierter Power-to-Gas-Anlagen in der Kreislaufwirtschaft

Csedő Zoltán, Imre Attila: A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia – merre tovább? 68
Power-to-Gas/Power-to-Methane technology – where to go?
Power-to-Gas/Power-to-Methan-Technologie – Wohin als nächstes?

A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia – merre tovább?

Dr. Birkner Zoltán

elnök

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások térnyerése két új kihívás elé állította az energiatárolással foglalkozó szakembereket. Az egyik kihívás a rövid távú, gyors válaszidejű, nagy teljesítmény leadására képes tárolási módszerek kidolgozása. Ezekre a módszerekre az ingadozó termelés miatti le- és felszabályozás miatt van szükség; jelenleg úgy tűnik, hogy megfelelő mennyiségű akkumulátorral a hazai igények kielégíthetők. A másik kihívás a nyári PV-alapú termelés fel nem használt részének szezonális tárolása. Jelenleg az így eltárolandó energiamennyiség még nem jelentős, de a tervezett kapacitásnövekedések (2050-re 80 GW hazai PV-kapacitás) hamarosan lehetővé teszik, hogy a nyári csúcstermelésből maradjon tételre is. Az itt felhasznált tárolóknak nagy tárolási kapacitásúnak kell lenniük (messze meghaladva a most, vagy akár a közeljövőben is rendelkezésünkre álló akkumulátor-összkapacitást), emellett az önkiszülésük (a terheletlen állapotban fellépő veszteség, azaz a tárolt energia „elszivárgása”) kellően kicsi legyen.

A rendelkezésre álló technológiák közül – a hazai adottságokat is figyelembe véve – a Power-to Gas technológia, azon belül is a Power-to-Methane technológia tűnik az egyik legígéretesebb, több hónapos, nagy tárolókapacitású megoldásnak. A betárolandó villamos energia segítségével több lépésben metánt hozunk létre, ami a földgázzal együtt tárolható és használható.

Magyarországon 2016 óta folynak ilyen irányú kutatások. Ezek intenzitását és eredményességét jelzi egyrészt a 2021-ben elindult

két, NKFIH támogatású Power-to-Methane project, valamint az éves rendszerességű, immár harmadszor megrendezett hazai konferencia. A 2019 tavaszán megrendezett I. Magyar Power-to-Gas Konferencia a hazai kutatóbázist mutatta be, míg a 2020-as – jobban nyitva az ipar felé – a technológia magyarországi szerepére fókuszált. A mostani, harmadik konferencia az utóbbi évek hazai K+F eredményeit ismerteti.

Hallhattunk előadásokat a technológia nemzetközi tapasztalatairól, majd a hazai pilotok eredményeiről és a hazai lehetőségekről. Több előadás foglalkozott azzal, hogy az alga-alapú biomassza megoldás lehet a technológia egyik problémájára, a nem megfelelő mennyiségű metanizálható szén-dioxid vagy biogáz mennyiségének növelésére. A technológiai fejlesztésekkel foglalkozó részben betekintést nyertünk a biokémiai fejlesztésről (kevert mikroba-közösségek alkalmazhatósága), a folyamatban keletkező hulladékhő felhasználhatóságával foglalkozó kutatásról, illetve egy kompakt metanizáló és ehhez kötött áramfejlesztő egység (pszeudo-akkumulátor) fejlesztéséről is.

A Power-to-Gas technológia pár év alatt a hazai laboratóriumokból kitorve már a félipari méreteknél tart. Remélhetőleg egy-két éven belül sikerül megtenni az utolsó lépést, ami után már egy jól használható, piacérett megoldással lesz gazdagabb az energiatárolási paletta.

A III. Magyar Power-to-Gas Konferencia (A Power-to-Gas technológiával kapcsolatos új fejlesztési irányok és alkalmazási területek Magyarországon) programja

Power-to-gas technológia	Power-to-gas alap kutatások
Az energiatárolás szerepe Magyarországon, <i>Steiner Attila államtitkár (ITM)</i>	Az algatermesztés és -felhasználás indiai és hazai lehetőségei, különös tekintettel a biogázra, <i>Bai Attila egyetemi tanár (Debreceni Egyetem)</i>
Nemzetközi tapasztalatok, ipari innovációk a power-to-gas technológiában, <i>Jászberényi Zoltán vezérigazgató (Pietro Fiorentini)</i>	Az algatermesztés, a biogáz-előállítás és a PtG-technológia módszertani elemzésének lehetősége, <i>Balogh Péter egyetemi tanár (Debreceni Egyetem)</i>
A power-to-gas technológia ipari környezetben való tesztelése: egy szennyvíztisztító telepen szerzett K+F tapasztalatok, <i>Csedő Zoltán egyetemi docens (Budapesti Corvinus Egyetem); ügyvezető igazgató (Power-to-Gas Hungary Kft.)</i>	Biogáz üzem mikrobiotájából kifejlesztett kevert mikroba közösség a power-to-methane folyamat hatékony katalizátora, <i>Szuhaj Márk, tudományos segédmunkatárs (Szegedi Egyetem)</i>
A nagykanizsai power-to-gas mintaprojekt bemutatása, <i>Pintér Gábor egyetemi docens (Pannon Egyetem)</i>	P2G alapú pszeudo-akkumulátorok, <i>Imre Attila egyetemi tanár (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem); tudományos tanácsadó (Energiatudományi Kutatóközpont)</i>
Alga biomasszából power-to-gas technológiával előállított biometanizációs folyamat műszaki feltételei, <i>Sinóros-Szabó Botond műszaki igazgató (Power-to-Gas Hungary Kft.)</i>	Biológiai metanizáció alapuló P2M technológia hatásfokának növelése hulladékhő-hasznosítással, <i>Groniewsky Axel egyetemi docens (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem)</i>
A pontosabb fotovillamos energiatermelés lehetősége Magyarországon, power-to-gas technológiával, <i>Zsiborács Henrik, tudományos munkatárs (Pannon Egyetem)</i>	Energiatárolás és innováció, <i>Birkner Zoltán elnök (Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH)</i>

Az energiatárolás lehetséges fejlesztési irányai Magyarországon

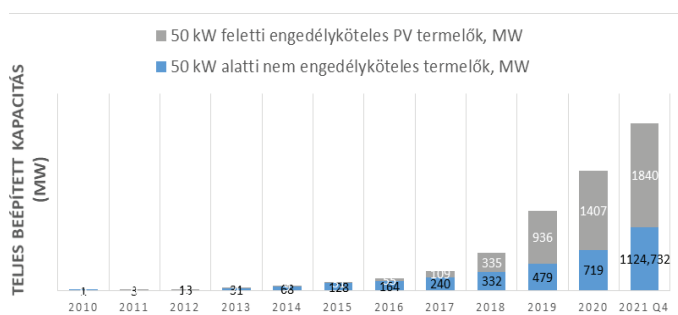
Steiner Attila

körforgásos gazdasági fejlesztéséért, energia- és klímapolitikáért felelős államtitkár

Nemzeti Energiastratégia elfogadásával Magyarország célkitűzése, hogy 2030-ra a villamosenergia termelés 90%-ban karbonmentes legyen, ami egyúttal a klímasemlegességhez vezető út egy fontos mérföldköve. Az energiaszektor szén-dioxid kibocsátásának csökkentése, a nukleáris energia használata mellett, a megújuló energia kiterjedt alkalmazásával és az energiahatékonyságra irányuló intézkedések révén teljesíthető.

Az energiamixben egyre nagyobb szerepet töltenek be a megújuló energiaforrások, elsősorban a napenergia hasznosításának köszönhetően.

Magyarország az elmúlt időszakban kiemelt hangsúlyt fektetett a naperőművek telepítésére, mind ipari szinten, mind pedig a lakossági programok támogatásával. Ennek része a Megújuló Támogatási Rendszer (METÁR), amely közcélú hálózatra betáplált áramtermelési kapacitások megvalósítását támogatja, az Otthonfelújítási program, melynek keretében energetikai korszerűsítésre és nap-elem rendszer telepítésére igényelhető támogatás, továbbá a Nemzeti Helyreállítási Terv keretében a lakosság számára napelemes rendszerek és energiatakarékos, korszerű, elektromos fűtési rendszerek kialakításához igényelhető támogatási program több mint 200 milliárd forint összegű támogatási kerettel.



1. ábra. Beépített PV kapacitás a magyar villamosenergia-rendszerben. Forrás: saját szerkesztés a MEKH és a MAVIR adatai alapján¹

A Kormány által nyújtott ösztönzők együttes eredményeként a beépített fotovoltaius kapacitás volumene dinamikusan nőtt, 2021 év végén már elérte a közel 3000 MW-ot (ld. fenti ábra). 2030-ra, a Nemzeti Energiastratégia tervei szerint, már legalább 6500 MW fotovoltaius kapacitás lesz a villamosenergia-rendszerben.

Az ily módon történő energiatermelés bár biztonságos és karbonmentes, időjárásfüggő mivolta miatt a villamosenergia-hálózat jelentős fejlesztését és a kiegyenlítő kapacitások növekvő rendelkezésre állását igényli.

A rövid távú termelés-ingadozásokat ma jellemzően elsősorban földgáztüzelésű erőművek egyenlítik ki, ezek viszont jelentős mennyiségű károsanyagot bocsátanak a levegőbe. Bár prototípus szinten létezik hidrogén elégetésre épülő erőmű, olyan innovatív megoldások terjedését szükséges elősegíteni, melyek lehetővé teszik a megtermelt villamos energia időleges tárolását és későbbi felhasználását.

A szükséges fejlesztések becsléséhez tudnunk kell, hogy mekkora tárolói kapacitás szükséges a villamosenergia-rendszer biztonságának garantálásához. Ez a kereslet mennyisége és időbelisége megbecslésén túl sok tényezőtől függ: nagyban befolyásolja például, hogy mekkora mértékben állnak rendelkezésre egyéb rugalmassági megoldások (gázerőmű kapacitások, keresletoldali válaszlépések) vagy, hogy mekkora az időjárásfüggő megújuló kapacitások mindenkori aránya.

Magyarország 2018 óta rendelkezik hálózati Li-ion akkumulátoros tárolókkal. 2021. november végén 20,7 MW tárolói kapacitást állt rendelkezésre a magyar villamosenergia-rendszerben.² A MAVIR becslése rövid távon mintegy 300 MW teljesítményű hálózati tárolói kapacitásra van szükség szerint 2025-ig.

Nem egyetlen tárolási technológia jelenti a megoldást és, az egyes megoldásoknak eltérő lehet a rendszerben betöltött szerepe. A tárolás időtartama sem elhanyagolható: a rövid- és hosszú távú villamosenergia-tárolás megoldása egyaránt szükséges, melyekre más-más technológiák bizonyulnak megfelelőnek, annak ellenére, hogy egy hosszú távra is alkalmas módszer nem feltétlenül zárja ki a technológia rövid távra való alkalmazhatóságát.

2020-ban világviszonylatban az alábbiak szerint alakult a telepített energiatárolói technológiák megoszlása:

Tárolási technológia	Telepített kapacitás (MW)
Szivattyús tározós erőmű	169.557
Lítiumion akkumulátor	1.629
Lendkerék	931
Sűrített levegős energiatárolás	407
Nátrium-kén akkumulátor	189
Ólomsavas akkumulátor	75
Redox folyadékáramos akkumulátor	72
Szuperkapacitás	49
Nátrium-fém-halogenid akkumulátor	19

A leginkább elterjedt szivattyús tárolók alkalmazhatóságának földrajzi korlátai vannak, így azok növekedési potenciálja nem kiemelkedő. A villamos energia tárolásának legdinamikusabban növekvő módja az akkumulátoros tárolás, mely egyre inkább versenyképpé válik. Előnye, hogy hatékonysága magas a többi technológiához képest (azok jelenlegi fejlettségi szintjén). A Nemzetközi

¹ Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (<http://www.mekh.hu/adatgyujtes>), valamint a Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (<https://www.mavir.hu/>) adatai alapján.

² Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (2021). Villamosenergia-ipari engedélyesek listája. Accessed. 2021.12.23. from <http://www.mekh.hu/villamosenergia-ipari-engedelyesek-listaja>

Energia Ügynökség jelentése szerint a technológiába áramló beruházások világszinten 40%-kal, míg az elosztó hálózatra csatlakoztatott, grid-méretű akkumulátorokba áramlók pedig 60% nőttek.³

Az elérhető akkumulátor technológiák közül jelenleg a Li-ion akkumulátorok bizonyulnak a legnépszerűbbnek. A Bloomberg számításai alapján⁴ e típusú akkumulátorok piaci részesedése Európában 12,9%-os növekedést ér el 2021-ben.

A Li-ion akkumulátorok családjához tartozó száraz, „szilárd halmazállapotú akkumulátorok” esetében jelezhető előre nagyobb potenciál, gyártásuk a következő öt éven belül elindulhat. Ezen akkumulátorok akár háromszor nagyobb energiasűrűséggel is rendelkezhetnek és jobban ellenállnak a hőnek, mint napjaink Li-ion akkumulátorai. Az új akkumulátor technológiák vonatkozásában előrelátható energiasűrűség növekedés további költségcsökkentést eredményezhet, ezáltal megerősítve azt, hogy az akkumulátor alapú energiatárolás továbbra is a (közel)jövőnk meghatározó részét fogja képezni.

Vannak egyéb ígéretes technológiák is, mint például a redox folyadékáramos akkumulátorok, melyek ugyan a piacra vezetés első szakaszánál tartanak, de több tulajdonságuk kedvezőbb lehet a ma piacvezető akkumulátoroknál.

A jövő akkumulátorai várhatóan környezetkímélőbbek, egyre kevesebb veszélyes és egyre több újrahasznosított anyagot fognak tartalmazni amellett, hogy erőforrás felhasználás vonatkozásában is hatékonyabbak lesznek. Ezt szolgálja a Bizottság által előterjesztett az *elemekről és hulladékelemekről, illetve a 2006/66/EK irányelv hatályon kívül helyezéséről és a (EU) 2019/1020 európai parlamenti és tanácsi rendelet módosításáról* szóló rendelettervezet, amely többek között az elemekben, hulladékelemekben található fémek újrahasznosítása vonatkozásában visszagyűjtési és újrahasznosítás-hatékonysági célokat tervez bevezetni az elemek életciklusa során a karbonlábnyom minimalizálása érdekében.

Magyarország is kiemelten foglalkozik az akkumulátoripar jövőjével. Hazánk több szempontból is az európai akkumulátoripari termelés egyik központjának számít, ezt támogatja az elmúlt években több nagy nemzetközi akkumulátorgyártó cég magyarországi letelepedése, számos autógyártó jelenléte az országban, valamint a kiterjedt beszállítói ipar. Gyártási képességeket tekintve világszinten a 12., Európában a 2-3. helyet töltjük be, elsősorban a távol-keleti gyártók jelenléte domináns.

Pozícióink megerősítése és további javítása érdekében a Magyar Kormány elfogadta a Nemzeti Akkumulátor Iparági Stratégiát („Stratégia”). A Stratégia célkitűzése versenyképes és fenntartható akkumulátor-értéklánc létrehozása és egy erős magyar K+F+I kapacitás megteremtése.

A Stratégia kiemelt területként kezeli az akkumulátorok alkalmazását a villamosenergia szektorban, azon belül a megújuló energiaforrások elterjesztéséhez szükséges tárolókapacitás biztosítását. Hazánk több típusú akkumulátor technológiában is rendelkezik potenciállal. A Kormányzat célja, hogy minden zöld technológia előtt nyitva tartsa a fejlődési lehetőségeket. Ezt szolgálják többek között a megfelelő szabályozói környezet kialakításának irányába tett erőfeszítések, az akkumulátor adatok megosztását lehetővé tévő di-

gitális technológiák („akkumulátor útlevel”) fejlesztése, valamint az újrahasznosítási lehetőségek feltérképezése és kutatása.

A közeljövőben a fenntartható hálózati tárolási megoldások elterjedése várható, melynek érdekében pénzügyi támogatási programot is tervezünk hirdetni. Emellett számos iparági szándék és beruházás is ebbe az irányba mutat.

Tehát az akkumulátor alapú energiatárolás rendkívül ígéretes, vitathatatlan problémája ugyanakkor, hogy csak rövid távú tárolás esetén rentábilis, így mindenképp vizsgálandók azok a technológiák, melyek hazánkban is lehetővé tehetik az energia hosszabb távú eltárolását.

Ilyen technológia lehet a Power-to-gas technológia (röviden: P2G, melynek lényege, hogy elektromos áram segítségével gázt – például hidrogént – állítunk elő, amit aztán eltárolhatunk és szükség esetén később felhasználhatunk), amely a kémiai energiatárolás egy ma még kevésbé használt, de nagy potenciált kínáló formája.

Az említett P2G technológia esetében a hidrogén előállítása a víz elektrokémiai bontásával (elektrolízisével) történik elektromos áram segítségével, oxigén képződése mellett. Amennyiben a felhasznált elektromos áram megújuló forrásból származik, „zöld hidrogén” keletkezik. Ezáltal nagy tisztaságú hidrogén jön létre, mely nemcsak a decentralizált, helyi hidrogénigényeket elégítheti ki, hanem az akkumulátor reális piaci alternatívájaként jelenhet meg hosszútávú energiatárolás esetén. A technológia még komplex és egyelőre kiforratlannak mondható, globálisan és Magyarországon is aktívan folynak a K+F projektek ezzel kapcsolatban.

Ahhoz, hogy a tiszta hidrogénfelhasználás ipari mértékeket öltözzön, szükséges a tárolás relatíve alacsony áron történő megvalósítása is.

A gyakorlatban jelenleg hidrogéngázt javarészt a felszín felett, nagy nyomású tartályokban tárolunk. Ennek során azonban kiemelten kell figyelni a robbanásveszélyre, költségesebb, továbbá kisebb mennyiség tárolható így. Nagy mennyiségek esetében a megfelelő geológiai paraméterekkel rendelkező sókavernákban való tárolás lehet a legalkalmasabb és legköltséghatékonyabb megoldás. A hosszabb távú, hidrogén formájában történő villamosenergia-tárolás eszköze lehet még a kémiai alapú tárolás (hidrogén átalakítása egyéb formákra), valamint a hidrogén folyékony formában történő tárolása. Ezek a technológiák azonban egyelőre rendkívül költségesek és/vagy kísérleti fázisban járnak.

Ami a tárolt hidrogén visszaalakítását illeti, szintén több technológia ismert. A modern CCGT-k képesek elégetni akár 30%-os hidrogéntartalommal rendelkező földgáz keveréket kb. 58%-os hatásfokkal, de ennél némileg magasabb hatásfokúak lehetnek az erőművekben használható tüzelőanyag-cellák.

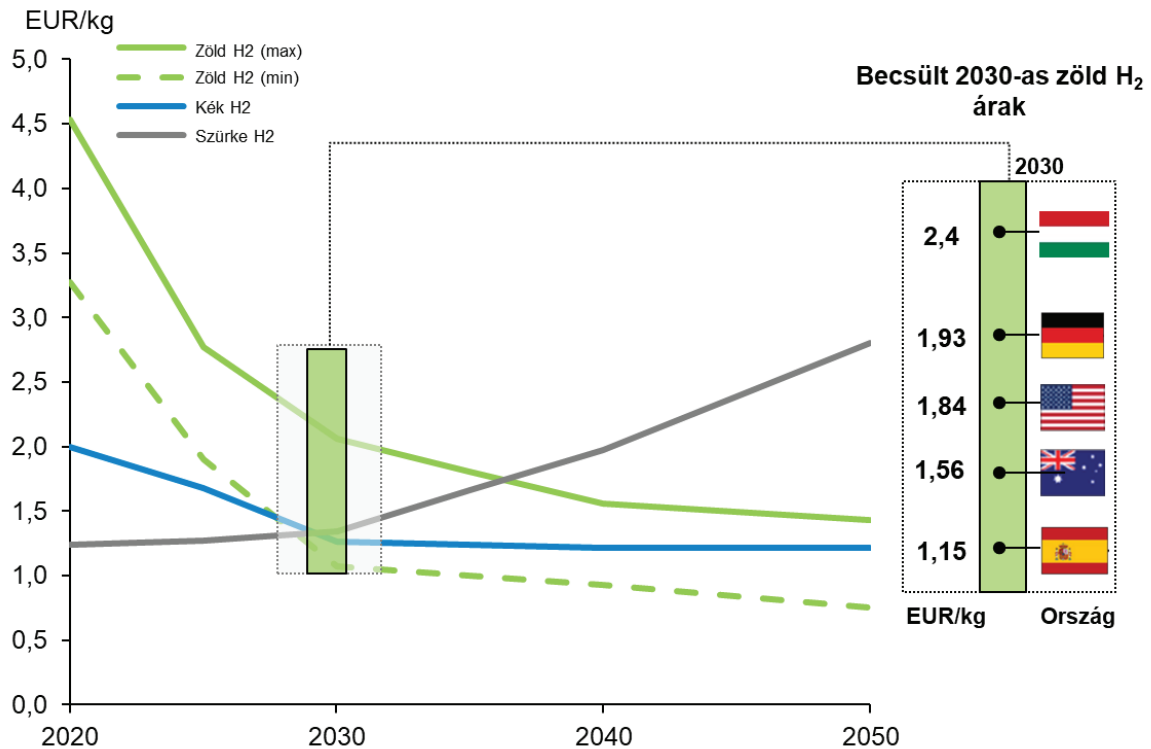
Tehát a megújulókból megtermelt 100 MWh áram 70%-os elektrolizáló hatásfokot feltételezve 70 MWh hidrogénné alakulna át, mely visszaalakításkor (60%) már csak 42 MWh-t jelentene, a jelenleg elérhető átlagos hatásfokokkal számolva. Ugyanakkor további kutatásokkal ezek a hatásfokok várhatóan növelhetők lesznek, ezért szükséges az ilyen jellegű projektek támogatása.

Összességében elmondható, hogy bár hosszabb időtávra tekintve a bekerülési költségek szignifikáns csökkenése várható, a karbonmentes hidrogén előállítása és tárolása jelenleg még nem versenyképes a fosszilis alapú alternatívákhoz képest.

A különböző prognózisok ugyanakkor azt mutatják, hogy az elkövetkező évtizedekben a költségek jelentősen csökkenni fognak. 2030-ra a zöld hidrogén átlagára várhatóan 2,4 EUR/kg körül fog Magyarországon alakulni.

³ International Energy Agency (2021). World Energy Investment. Accessed 2021.12.16. from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e6b3821-bb8f-4df4-a88b-e891cd8251e3/WorldEnergyInvestment2021.pdf>

⁴ Bloomberg (2021). Europe Lithium Ion Battery Market to expand at a healthy CAGR of around 7.5% over the forecast period of 2021-2031. [online article]. Accessed 2021.12.23. from <https://www.bloomberg.com/press-releases/2021-07-05/europe-lithium-ion-battery-market-to-expand-at-a-healthy-cagr-of-around-7-5-over-the-forecast-period-of-2021-2031>



2. ábra. A hidrogén árának várható alakulása (EUR/Kg). Forrás: IFUA Horváth & Partners a következő forrás alapján: Hydrogen Council – McKinsey: Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. February 2021. p.12.

Projekt azonosító száma	A pályázó(k) neve	Projekt címe	Odaítelt támogatás (Ft)	Projekt elszámolható összköltsége (Ft)
2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00001	Magyar Földgáztároló Zrt.	Akvamarin Projekt – Hidrogén energiatárolási innováció a Magyar Földgáztároló Zrt.-nél	1 900 000 000	2 862 038 198
2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00002	VPP SOLAR Fejlesztő, Építő és üzemeltető Kft.	Karbonmentes Innovatív Hidrogén Megoldás Kereskedelmi Léptékű Piaci Fejlesztése Projekt	2 000 000 000	3 901 603 908
2020-3.1.1-ZFR-KVG-2020-00003	Bükkábrányi Fotovoltaikus Erőmű Projekt Kft. Szegedi Tudományegyetem	A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése	1 200 000 000	1 823 984 729
2020-3.1.1-ZFR-KVG-2020-00006	Délzalai Víz- és Csatornamű Zrt. Pannon Egyetem Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem	Power-to-Gas - Szezonális energiatárolásra alkalmas metanizáló berendezés fejlesztése	1 300 000 000	1 448 990 139
2020-3.1.1-ZFR-KVG-2020-00009	BIOGÁZ UNIO Zrt. BAKONY BIO Zrt. Szegedi Biológia Kutatóközpont	Cirkuláris bioenergia termelés a biogáz és P2G technológiák összekapcsolásával	1 600 000 000	2 312 673 011

Ugyanakkor, kijelenthetjük, hogy a beruházások jelenleg még önmagában, pusztán piaci alapon nem valósíthatók meg, ezért ezeket a projekteket pályázatokkal szükséges ösztönözni.

Bár elsődlegesen a nehézgépjárművek meghajtásában és az ipari felhasználásban látjuk a hidrogén szerepét, az energiatárolási megoldásokkal kapcsolatos K+F projekteket is támogatunk a technológia érettségének javítása érdekében.

A megújulókból, főleg napelemes kapacitásból előállított villamos energia hidrogén segítségével történő tárolása hozzájárulhat a Nemzeti Energiastratégia célkitűzéseihez is. Ugyanakkor, számításaink szerint a stratégia időtávjá alatt még nem lesz költséghatékony a hidrogén alapú energiatárolás. Ez azonban megváltozhat, ha figyelembe vesszünk egyéb tényezőket is, például a származási

garanciák elterjedését, vagy a várhatóan magasabb CO₂ kvótaárakat.

A hidrogén alapú energiatárolás kutatását több projekt keretében támogatja az állam.

A globális energetikai tendenciák szükségessé teszik azon technológiák kutatását, melyek megoldást nyújthatnak a megújuló, időjárásfüggő források használata miatt felmerülő problémákra. Az energiatárolással kapcsolatos kutatások és fejlesztések egyre inkább jelen vannak hazánkban, ennek eredményeként pedig jelentős beruházások születtek már meg és vannak tervben a jövőre vonatkozóan is. A jelenleg domináns akkumulátoros megoldások mellett várhatóan a hidrogén szerepe is felértékelődik majd Magyarországon a jövőben.

Biogáz termelés jövőbeni szerepe és lehetőségei az energiahatékonyság fokozása területén

Jászberényi Zoltán

Fiorentini Magyarország vezérigazgató

Magyarországon a biogáz termelése és hasznosítása az elmúlt évek tapasztalatai alapján, kijelenthető, hogy érdemtelenül kevés figyelembe részesült.

Ugyanakkor megújuló energiaforrások igénybevétele világszerte az energiagazdálkodás és a körforgásos gazdálkodás egyik központi feladata lett. Alkalmazásukat a környezetvédelmi érvek mellett a szénhidrogén készletekkel való takarékos gazdálkodás is motiválja.

A European Biogas Egyesület (EBA – <https://www.europeanbiogas.eu/>) és a Gas Infrastructure Europe (GIE) által közölt európai biometán térkép alapján az alábbi tények jellemzik az európai biogáz ágazatot [1]¹:

- Európában 18 855 biogáz és 726 biometán üzem működik.
- Az elmúlt évtizedben a biometán üzemek száma megkétszereződött 4 éven belül.
- 2019-ben 176 TWh biogázt és 26 TWh biometánt termeltek az európai üzemek és a folyamatban levő, már engedélyezett projekteket is figyelembe véve a számítások szerint ez az ágazat 370 TWh biometán előállítására lesz képes 2030-ra és 1020 TWh 2050-re.

A biogáz szektorban megvan a lehetőség az üvegházhatást okozó gázok csökkentésére világszerte (ÜHG) kibocsátás 10-13%-kal. Az EU fosszilis tüzelőanyagaihoz viszonyítva, a biogáz termelés az ÜHG-kibocsátás akár 240%-át, a biometán pedig akár 202%-át is megtakaríthatja.

A Franciaországban működő Ökológiai Átmeneti Minisztérium eredménytáblája szerint Franciaország, amely élen jár az új biogáz-erőművek építésében, 2019-ben 151 új erőművet telepített kb. 39 MW villamosenergia-termelésre, míg Németország csak 2019-ben 83 új erőművet telepített hasonló módon villamosenergia-termelés érdekében.

Magyarországon a bruttó hazai villamosenergia-termelésben biogázból termelt villamos energia esetében látható, hogy hasonló növekedés nem tapasztalható. A Magyar Energia és Közműszabályozási Hivatal 2020-ig rendelkezésre álló adatai alapján a megújuló energiatermelés arányaiban jelentősen a napenergia termelés irányába mozdult el, érthető módon az ott megjelenő beruházás ösztönző programok hatására is. Míg a megújuló villamosenergia-termelés 2014-hez képest 97%-os növekedést mutat, addig a biogáz alapú villamosenergia-termelés ebben az időszakban 11%-os növekedést mutat.

A biogáz és biometán jelentősége megjelenik a Magyar Kormány által elfogadott Magyarország Nemzeti Energia- és Klímatervében. Az alternatív gázforrások hasznosításának tekintetében megfogalmazóik: becslés szerint a magyar biogáz-potenciál 2030-ra a magyar földgázfogyasztás 1%-ának kiváltására adhat reális lehetőséget, ami évi mintegy 85 millió m³-t jelent. 2040-re további növekedés várható, így a hazai biogáz-potenciál elérheti a 100 millió m³-t.

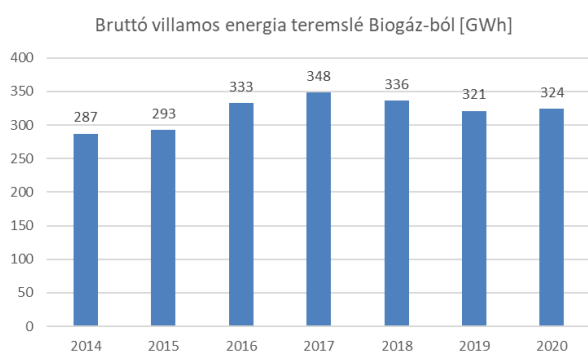
A biogáz mellett, nagyon helyesen a stratégia alternatívaként tekint a hidrogénre is, ezért a hidrogén földgázhálózatba történő táplálásának minél nagyobb arányú megvalósítására.

A stratégiai irány tehát megfogalmazásra került, de vajon a megvalósítása megtörténik-e?

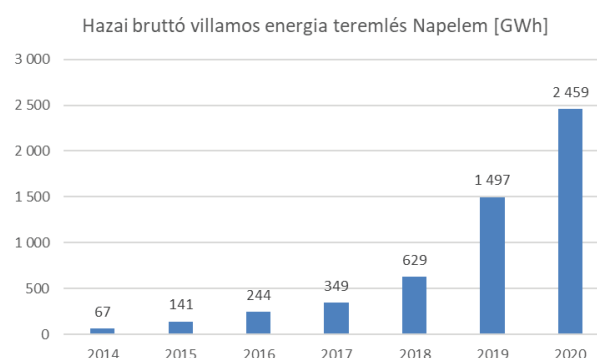
Nagyon fontosnak tarjuk azt figyelembe venni, hogy a biogáz / biometán üzemek megvalósíthatóságát és hasznosíthatóságát, valamint a hozzá tartozó üzleti modelleket, amivel érték fenntartható és tiszta energia állítható elő, az elmúlt évek energetikai politikája és technológia fejlődése nagyban befolyásolja.

Néhány fontos szempont, melyek lökést adhatnak a hazai biogáz üzemek további elterjedésének.

Ezek a szempontok elsősorban az olaszországi biogáz előretörésének tapasztalatait ötvözik, hiszen társaságunk központja



Forrás: MEKH – 2020-as bruttó hazai villamos energiatermelés



¹ Forrás : EBA – European Biogas Association - Renewable Energy House -RENEWABLE GAS SUCCESS STORIES - www.europeanbiogas.eu

Olaszországban van, ahol mi is mint Pietro Fiorentini biogázüzem fejlesztő ágazatunkkal tagjai vagyunk a CIB (Consortio Italiano Biogaz) – Olasz Biogáz Szövetségnek. Talán kevesen tudják, hogy az olasz mezőgazdasági biogáz megszületése óta, ma Kína és Németország után a harmadik lett világszerte, 4 milliárd eurós beruházással és közel 12.000 ágazati alkalmazottal. 2021-es adatok alapján Olaszországban több mint 1.800 biogáz termelő egység létezik közel 8.300 GWh energiatermelési kapacitással.

Biogáz/Biométán termelésének és integrációjának holisztikus megközelítése

A biogáz előállításához alapanyagra van szükség. Biogáz üzem létrehozása nagy hatékonyságú környezetvédelmi beruházás, mivel anaerob körülmények között történik a rothasztás, nincs felmerülő talaj vagy levegőszennyezés, melynek eredményeként a metántermelő baktériumok nyersenergiát állítanak elő.

Biogáz termelés jövedelmezőségének feltételei között szerepel a megfelelő mennyiségű alapanyag, a beruházás helyének centralizálása, optimalizálása, szükséges épületek megléte vagy az infrastrukturális feltételek megteremtése, elegendő nagyságú szántóföldterület a hítrágya felhasználásához stb.

Az Olasz Biogáz Konzorcium tagjai a kezdetektől fogva kérdéseket tettek fel maguknak az anaerob lebontás jelentésével és szerepével kapcsolatban a gazdaságban, és stratégiai tervet dolgoztak ki, amelynek célja a mezőgazdasági biogáz előállítása a minőségi élelmiszerek előállítása mellett, hiszen nem lehet egyetlen biogáz program célja levenni a hasznos és jó minőségű termőföldet az élelmiszer gyártás elől.

Ezek alapján megszületett egy komplex analitikai módszer melynek neve „Biogasdonerigh®” (<http://www.consorziobiogas.it/publicazioni-in-evidenza.htm>) – ami annyit jelent, hogy „Biogázhelyesen”.

Az analitikai megközelítés lényege, hogy az anaerob lebontás integrálása a gazdaságban, hogyan teszi lehetővé a biogáz előállításához szükséges biomassza termelését anélkül, hogy csökkentené az élelmiszer- vagy takarmánytermelést a fogyasztók számára.

A Biogasdonerigh® elveknek köszönhetően lehetőség nyílik a gazdálkodási tevékenységek teljes megváltoztatására és a talaj egész éven át tartó hasznosíthatóságára, a vetésciklus diverzifikálására, a trágyafelhasználás csökkentésére fermentátum felhasználásával és ezáltal a talaj termékenységének javításával, megújuló energia felhasználásával az üzem működéséhez.

A „biogasdonerigh®” kifejezést egy olyan technológiai platform leírására tartalmazza, amely egyesíti az anaerob technológiák és egyéb ipari és mezőgazdasági gyakorlatokat alkalmazásának lehetőségeit, különböző adottságok figyelembevételével.

A módszertan egyesíti olyan technológiai elemeket, amely körül egy gazdálkodó újra tervezheti tápanyagciklusait és földhasználatát annak érdekében, hogy:

- Növelni tudja a gazdaság elsődleges termelését, további szén-dioxid kibocsátást rendelve az anaerob emésztés számára, az emésztő takarmányának növelésével állati szennyvíz hozzáadásával, szerves városi és ipari hulladékokat is adott esetben felhasználva.
- Gazdálkodási ciklus áttervezése az étel alapanyagok termelési volumenének csökkentése (gyakran növelése...) nélkül és takarmánygyártás a biogáz üzem ellátása érdekében.
- A fosszilis műtrágyák és üzemanyagok szükségességének csökkentése vagy teljes elkerülése,

- A talaj szervesanyag-tartalmának növelése, a vetésciklus és az egynyári növényzet kultúrák telepítése, valamint a a nitrogénrögzítés növelése.
- A szerves trágyázási ráfordítások csökkentése, ha az állattenyésztési ágazat növekedésének igénye növekszik, ami azért kritikus mert ez az iparág jelentősen hozzájárul az üvegházhatású gázok nagy részéért kibocsátásáért

Magyarországnak igen kedvező lehetőségei vannak a biogáztermelésre, mivel az állattenyésztés jelentős része koncentrált állattartó telepeken történik, ahol állandó probléma a felhalmozódó trágya kezelése.

Maga a módszertan elérhető és publikus, mindenképpen jó támpontot ad mezőgazdasági vállalkozók számára biogáz üzem megvalósíthatóságának tanulmányozására.

Biogáz nem csak villamos energia vagy hő-termelés érdekében

Európa legtöbb országban állítanak elő biogázt melyet földgáz-hálózatba betáplálnak. A legnagyobb arányban nyersgázként mint helyi energiaforrást használják fel villamos áram vagy hőtermelés érdekében. A betáplálás feltételét jelentő gáztisztító és gázdúsító technológiák működnek Ausztriában, Dániában, Olaszországban, Franciaországban, Németországban, Hollandiában, Svédországban és Svájcban.

EU szinten a 2003/55EC számú irányelv ad keretet a földgáztól eltérő eredetű és összetételű gázoknak – ideértve a biogázt, illetve biometánt – földgáz vezetékbe történő betáplálását illetően. Az irányelv kimondja, hogy negatív diszkrimináció nem alkalmazható, amennyiben ezek a gáztípusok megfelelnek az érvényes szabványoknak és rendeleteknek.

Garantálni kell ez esetben a hozzáférhetőséget, ugyanakkor a fenti előírásoknak tartalmazni kell a betáplált gáz kémiai összetételére vonatkozó feltételt. Fontos fejlemény, hogy az Európai Bizottság 2021. december 15-én publikálta a „Hydrogen and decarbonised gas package” (a továbbiakban röviden: ‘Gas Package’ vagy ‘csomag’) nevű, nagy jelentőségű jogszabálycsomagját, amely tartalmazza a megújuló alapú gázokról, földgázzal és hidrogén belső piacára vonatkozó szabályokról szóló irányelv tervezetét, valamint egy kapcsolódó rendelet tervezetét a részletszabályokról.

A „Gas Package” fő céljai:

- Megújuló alapú és low-carbon gázok integrációjának elősegítése a meglévő gázhálózatokba,
- lehetővé tenni dedikált biogáz, hidrogén-infrastruktúra és -piac létrejöttét, valamint fejlődését, beleértve akár az EU-n kívülről érkező hidrogén importot is, valamint azt, hogy a hidrogén az energetikai rendszer szerves részévé váljon,
- Jobban integrált hálózattervezés kikényszerítése a tagállamokban, illetve EU szinten a villamosenergia-, földgáz- és hidrogénhálózatok között, továbbá az ilyen irányú fejlesztések vonzóvá, kiszámíthatóbbá tételét a beruházások számára,
- A fogyasztók védelme, valamint elkötelezettségük és lehetőségeik előmozdítása a megújuló alapú és a low-carbon gázpiacokon.

A rendelet tervezetben többek között megjelenik a definíciók között:

- *megújuló alapú gáz* (renewable gas) ami magába foglalja a biogázt a 2018/2001/EU Irányelv 2. cikkely 28. pontjának de-

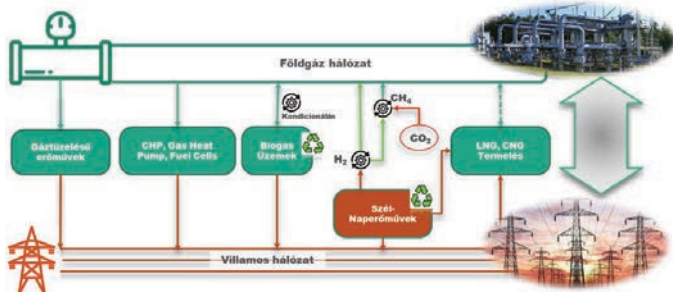
finíciója szerint, beleértve a biometánt, és a megújuló alapú gáznemű üzemanyag részét a nem-biológiai eredetű megújuló üzemanyagoknak ('RFNBO')²

- **földgáz rendszer** (natural gas system): infrastruktúrák rendszere, amelybe bele értendők a vezetékek, LNG terminálok és tároló létesítmények, amelyek olyan gázokat szállítanak, amelyek elsődlegesen metánból állnak, ideértve a *biogázt* és a *biomasszából származó gázt*, különösen a biometánt, vagy egyéb típusú gázt, műszaki és biztonsági szempontból bevezethető és szállítható a földgáz vezetékrendszerben.

A biogáznak földgáz vezetékbe történő betáplálási folyamatának széleskörűvé válását eddig a törvényi és pénzügyi háttér hiányosságai nehezítették. Általános hatású problémái mellett tovább nehezítik a biogázoknak az alapanyagra, illetve az előállítás módjára visszavezethető eltérő sajátosságai. Ezek fokozzák a biogázok hálózati fogadásával és felhasználásával kapcsolatos ellenérzéseket.

A most megjelent irányelv tervezet 87. cikkelye rendelkezik a tagállami jogharmonizációról, amely alapján 2023.12.31-ig meg kell alkotni azon tagállami jogszabályokat, rendeleteket és adminisztratív intézkedéseket, amelyek biztosítják az irányelvnek történő megfelelést a nemzeti jogban.

Fontos szempont, hogy a következő években a jogszabály alkotó az energia szállítási és elosztási infrastruktúrát egy holisztikusan egységes szimbiózisban kezelje és lépjen ki a tipikus földgáz vagy villamos energia elosztási modellből. A földgáz és villamos hálózatok egységes ökorendszerben történő értelmezése és feladatuk meghatározása, mint energia elosztók, elengedhetetlen feltétele lesz az új kihívásokkal szembeni helytállásnak



Sajtó forrás: Energetikai elosztói ökorendszer elemei

Biogáz, mint egyensúlyozó mechanizmus a decentralizált energiaellátás és tárolás folyamatában

Egyre világosabb mindenki számára, hogy a jövő klímapolitikai céljai nem teljesíthetők a megújuló energiaforrások nélkül. Az is biztosan látszik, hogy minél nagyobb mértékű és minél inkább decentralizált energiatermelésről beszélünk, ez annál nagyobb kihívást jelent a rendszerek kiegyensúlyozásában.

Egyre inkább felmerül a jövő energiarendszereiben egyfajta „kommunalizációs” folyamat, azaz egyre nagyobb szerepet kap a közösség pl. szövetkezeti, lakóközösségi, de akár települési önkormányzati szerep a termelő-fogyasztó („prosumer”) megjelenése az

² „nem biológiai eredetű, folyékony vagy gáznemű, megújuló energiaforrásokból származó közlekedési célú üzemanyagok” (RFNBO): a bioüzemanyagok és a biogázok kivételével olyan folyékony vagy gáznemű üzemanyagok, amelyek energiataralma a biomasszától eltérő megújuló forrásokból származik, és amelyeket a közlekedési ágazatban használnak (RED-II, 2. cikkely, 36. pont)

energiatermelésben, -tárolásban, sőt akár az energiakereskedelemben is.

Ezen felül a közösségek és a prosumerek is részt vehetnek a villamosenergia-termelés és fogyasztás mindenkori egyensúlyának megteremtésében, amennyiben rugalmassági kapacitásaikat felajánlják a kiegyenlítő energia piacokon, pl. az ún. aggregátorok révén. Ez a folyamat Magyarországon is jelentkezik, és egyre inkább számolni kell vele az villamosenergia-piacon és az ellátásbiztonság fenntartásában egyaránt.

Az „energiaközösség” (az EU 2019/944 számú EU irányelv angol változatában; „*citizen energy community*”, míg a magyar fordításban „helyi energiaközösség” szerepel) olyan jogi személy, amely önkéntes és nyitott részvételen alapul, és amelyet ténylegesen tagok vagy részvényesek irányítanak, akik, illetve amelyek természetes személyek, kisvállalkozások, helyi hatóságok, ideértve az önkormányzatokat is; amelynek elsődleges célja hogy tagjai vagy részvényesei, vagy a működési területük számára környezeti, gazdasági és szociális közösségi előnyöket biztosítson; és amely részt vehet energiatermelésben beleértve a megújuló forrás alapú termelést.

Ezeket túl az energiaelosztásban, az energiaellátásban, az energiafogyasztásban, az aggregálásban, az energiátárolásban, vagy az energiahatékonysági szolgáltatásokban, illetve az elektromos járművek feltöltésére irányuló szolgáltatásokban is részt vehet.

A MEKH egyik állásfoglalása már utal is arra, hogy a magyar energiaközösségek szövetkezet vagy nonprofit gazdasági társaság formájában működő jogalanyok lehetnek. A Hivatal már figyelemmel kíséri az energiaközösségek alapítását, továbbá az ezeket akadályozó tényezőket azonosítja és javaslatokat fogalmaz meg ezek elhárítására. A közösségi energiatermelés Közép-és Kelet-Európában, köztük hazánkban sem elterjedt jelenség még.

Ezen célok elérését közvetett módon segítheti minden olyan energiatermelési és -felhasználási működési forma is, amely elősegíti a megújuló energiaforrások villamos-energia rendszerbe integrálását és azok biztonságos üzemét. Ilyen működési forma lehet pl.

- az energia termelésére, hatékony felhasználására, mindezek rendszer-szabályozást,
- hálózat üzemeltetést segítő működtetésére és társadalmi, környezeti előnyök kiaknázására szerveződött közösségek (energiaközösségek),
- a több felhasználói terhelést és/vagy termelt villamos energiát kombináló értékesítési,
- vásárlási, vagy aukciós célú aggregálás.

2021-ben már megjelent energiaközösségek kialakítását és működését támogató mintaprojekt megvalósítására (2020-3.1.4-ZFR-EKM)³ [2], pályázat.

Tekintettel, hogy egy biogáz üzem megvalósul az adott kedvező feltételek mellett, meggyőződésünk, hogy szerves részévé alakulhat ilyen energiaközösségeknek.

Kitekintés a nemzetközi szakirodalom alapján: Továbblépés a biogáz-fókuszú együttműködésekről a power-to-gas alapú üzletimodell-innováció és a körkörös gazdaság felé

A fentebb említett közösségi alapú biogáztermelés koncepciója a nemzetközi szakirodalomban is megjelenik. Ezen a téren kiemelt célkitűzés lehet olyan üzleti modellek kialakítása, amelyek fő célja

³ <https://nkfih.gov.hu/palyazoknak/egyeb-tamogat/energiakozossegek>

a folyamatos, tiszta és megfizethető háztartási energiatermelés biztosítása, alacsonyabb költségszintet elérve, mint más energiaforrásoké [3]. Az újabb kutatások rámutatnak, hogy számos ipari szektor (például közművek, közlekedés, hulladékkezelés és mezőgazdaság) használ biogáztechnológiát megújuló energiatermelés céljából, mert ily módon társadalmi és környezeti felelősségvállalásukat demonstrálni tudják és növelhetik erőforrás-hatékonyságukat. A megújuló energiatermelés mellett viszont a kollaboratív biogáztermelő rendszerekkel, amelyekben az értéklánc különböző szereplői is megjelennek (például nyersanyag-biztosítók, biogáztermelők és biogázfogyasztók) fejleszthetők a vidéki területek is, új lehetőségek nyithatók a fenntartható növekedés területén és új bevételi források jelenhetnek meg.

Fontos azonban látni, hogy a biogáztermelők a gyakorlatban ezeket az elméleti lehetőségeket nehezen tudják kihasználni, mivel termelési, elosztási és marketing jellegű kihívásokkal kell szembenézniük. Míg egyes kutatások a szabályozási környezet kedvezőbbé alakítását, más kutatások az innovációs folyamatokat emelik ki, addig egyre gyakrabban jelenik meg a szereplők hálózatokba történő szervezésének igénye is mint potenciális megoldás, kiemelt fókusszal az új üzleti modellek fejlesztésére [4]. A hálózatok kiemelt szerepe hasonlóképp igaz a power-to-gas (P2G) szegmens esetében is [5]. Ezen innovatív technológia révén a megújuló villamos energia első lépésben zöld hidrogénné, második lépésben pedig a biogázban lévő szén-dioxid és a zöld hidrogén bevezetésével egy elkülönített (ex-situ) reaktorban biometánná alakítható [6].

Az üzletimodell-innovációk kialakításában egyszerre lehet markáns szerepe a termékek / szolgáltatások, az erőforrások és folyamatok, illetve az értékesítési csatornák és szegmensek új-rakonzálásának [7]. A szakirodalom alapján a mezőgazdasági biogáztermeléshez kapcsolódó üzletimodell-innovációk egyik módja lehet olyan részben közösségi, részben magántulajdonú hálózatok létrehozása, amelyek befektetnek a mezőgazdasági biogáztermelésbe, mivel ezek a befektetések valóban képesek lennének a kis- és középvállalatok számára új üzleti lehetőségeket generálni a mezőgazdasági szektorban [8]. Más kutatási eredmények szerint a biogáztermelők pénzügyi teljesítménye azzal is javítható, ha egy proaktív vállalati fenntarthatósági stratégiát követnek az üzemeltetők és ezzel megteremtik a lehetőséget az üzleti modellük átalakítására és az érintettek számára fenntartható érték teremtésére [9]. Ehhez azonban egy holisztikus és különböző fenntarthatósági kritériumokat figyelembe vevő megközelítésre is szükség lehet [9]. Továbbá, bár egyes tanulmányok azt hangsúlyozzák, hogy a szabályozóknak, a befektetőknek és a kutatóknak rugalmas feltételekkel bíró finanszírozási lehetőséget kell kidolgozni, át kell strukturálni a támogatási rendszereket, illetve lazítani kell a gázhálózati menedzsmentet, esetükben is megjelenik – a hálózatosodás jegyében – a biogáz végfogyasztóinak bevonása a fejlesztési projektekbe [10].

A lehetőségek mellett ugyanakkor szembeütnő lehet az is, hogy – definíció alapján is – a biogáz-üzemekhez kapcsolódó P2G üzemtelepítés is üzletimodell-innovációs lehetőségeket teremt a biogáz-üzemeltetők számára:

- Az erőforrásokat, folyamatokat tekintve az alapinfrastruktúra kiegészül az elektrolízissel és az ex-situ metanizációs reaktorral, azaz megváltozik az értékteremtési konfiguráció [11].
- Megváltozik a végtermék (biogázból biometán) és kiegészülnek az értékesítési lehetőségek (cseppfolyósítás vagy komprimálás a közlekedésben történő felhasználáshoz, be-

táplálás a földgázhálózatba energiátárolási céllal [12] vagy fűtési, energiatermelési céllal a termelési ponttól eltérő helyen, esetleg alapanyagként felhasználás a vegyiparban)

- Kiegészül az értékajánlat, hiszen egy P2G üzem képes a hálózat-kiegyenlítésre az elektrolízis lépésében [13] és a szén-dioxid újrahasonosításra a metanizációs lépésben (azaz nemcsak a szén-dioxid leválasztása történik meg, hanem az átalakítása is, ezzel pedig dekarbonizációt is támogatóvá válik a folyamat [14]).

A mezőgazdasági biogáztermeléshez és a P2G-hez kapcsolódó üzletimodell-innovációk másik meghatározó koncepciója a körkörös gazdaság, amely egy fenntartható alternatívát jelent a lineáris „take-make-dispose”, azaz, „megvenni-elkészíteni-eldobni” folyamat helyett. A körkörös gazdaság fejlesztésének célja szintén átalakíthatja a meglévő üzleti modelleket, ráadásul hatással lehet a szabályozói környezet alakulására [15], azzal céllal, hogy minimalizálja az erőforrásokat az input oldalon, illetve a hulladékot és a kibocsátást az output oldalon [16]. Mivel a biogáztermelés alapvetően hasznosít újra mezőgazdasági melléktermékeket, a P2G pedig többlet megújuló villamos energiát és szintén felesleges szén-dioxidot hasznosít újra, a P2G-alapú üzletimodell-innováció a biogáztermelés esetében hozzájárul a körkörös gazdaság fejlesztéséhez is. Továbbá, az üzletimodell további bővítését jelentheti a napelemes rendszerek telepítése a biogáztelepek mellé, amelyet a szakirodalom szintén ígéretes lehetőségként tart számon [17].

Összegzés

A biogázt a hazai energiaellátásban tehát illúziók és a mezőgazdasági termelés „biogáz centrikussá” alakításának szándéka nélkül, de érdemi energiaforrásnak kell tekintenünk.

A hazai biogáz termelésének várható mértéke alapján nyilvánvaló, hogy a magyar energiaszektor földgáz függőségét a biogáz önmagában nem képes jelentős mértékben enyhíteni.

A hazai adottságokat figyelembe véve és a nemzetközi trendeket is szabványosítási folyamatokat elemezve azonban a becslített évi 200 – 300 millió m³ földgázimport kiváltása lehetőséget biztosít.

További potenciális értéket jelent a lokális rendelkezésre állás lehetősége, ami az adott térségben mind környezetvédelmi mind estleges korlátozások esetén ellátás biztonsági előnyt képvisel, ezáltal fontos elemévé válhat a jövőben kialakuló energiaközösségeknek. E folyamat egyik fontos eszköze lehet a biogáztermelésben érintettek összekapcsolása egy hálózatos rendszerbe, illetve a biogázüzemek P2G-n alapuló üzletimodell-innovációjának megvalósítása a körkörös gazdaság fejlesztését szem előtt tartva.

Irodalom

1. EurObserv'ER: Biogas Barometer, August 2021 (<http://www.eurobserv-er.org>)
2. AGRÁRTUDOMÁNYI KözLEMÉNYEK, 2013/ Kith Károly - A biogáz termelés jelentősége Magyarországon – Debreceni Egyetem Agrár-és Gazdálkodástudományok Centruma, Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar, Földhasznosítási, Műszaki és Területfejlesztési Intézet, Debrecen - 2013
3. EBA - RENEWABLE GAS SUCCESS STORIES - Renewable Energy House (Rue d'Arlon 63–65 • 1040 Brussels, Belgium) - 2020
4. Csete J. – Szunyog I.: Biogázok a földgázrendszerben, kereskedelmi kapcsolatok. GasCon 2009 Szakkonferencia előadás, Budapest, 2009. március 11.

Hivatkozásjegyzék

- [1] EBA – European Biogas Association, „Renewable Energy House – RENEWABLE GAS SUCCESS STORIES,” 2019. [Online]. Available: www.europeanbiogas.eu. [Hozzáférés dátuma: 03 02 2022].
- [2] NKFIH, „Energiaközösségek,” 2021. [Online]. Available: <https://nkfi.gov.hu/palyazoknak/egyeb-tamogatas/energiakozossegek>. [Hozzáférés dátuma: 03 02 2022].
- [3] R. G. Hamid és R. E. Blanchard, „An assessment of biogas as a domestic energy source in rural Kenya: Developing a sustainable business model,” *Renewable Energy*, 121, pp. 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.032>, 2018.
- [4] N. P. E. Karlsson, M. Hoveskog, F. Halila és M. Mattsson, „Early phases of the business model innovation process for sustainability: Addressing the status quo of a Swedish biogas-producing farm cooperative,” *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 2759-2772. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.136>, 2018.
- [5] Z. Csedő és M. Zavarkó, „The role of inter-organizational innovation networks as change drivers in commercialization of disruptive technologies: the case of power-to-gas,” *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 28, pp. 53-70. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3388>, 2020.
- [6] M. Bailera, L. P., P. B. és R. L.M., „Integration of Amine Scrubbing and Power to Gas,” in *Energy Storage*, Springer, Cham, 2020, pp. 109-135. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46527-8_5.
- [7] R. Amit és C. Zott, „Creating value through business model innovation,” *MIT Sloan Management Review*, 53 (3), pp. 41–49. DOI: 10.1515/gfkmir-2017-0003, 2012.
- [8] N. P. E. Karlsson, F. Halila, M. Mattsson és M. Hoveskog, „Success factors for agricultural biogas production in Sweden: A case study of business model innovation,” *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2925-2934. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.178>, 2017.
- [9] N. P. Karlsson, „Business models and business cases for financial sustainability: Insights on corporate sustainability in the Swedish farm-based biogas industry,” *Sustainable Production and Consumption*, 18, pp. 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.01.005>, 2019.
- [10] A. Yousuf, S. Sultana, M. U. Monir, A. Karim és S. R. B. Rahmaddulla, „Social business models for empowering the biogas technology,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12, pp. 99-109, <https://doi.org/10.1080/15567249.2016.1255677>, 2017.
- [11] G. Pörzse, Z. Csedő és M. Zavarkó, „Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 14 (8), p. 2297. <https://doi.org/10.3390/en14082297>, 2021.
- [12] Z. Csedő, B. Sinóros-Szabó, M. Zavarkó és B. Sinóros-Szabó, „Biometánt előállító és hasznosító powerto-gas technológia műszaki és rendszerszintű fejlesztése,” in “Hogyan tovább a klímatudatos jövő felé?” konferencia, 2018.11.26., Budapest, Innovációs és Technológiai Minisztérium, 2018.
- [13] Z. Csedő, M. Zavarkó, B. Vaszkun és S. Koczás, „Hydrogen Economy Development Opportunities by Inter-Organizational Digital Knowledge Networks,” *Sustainability*, 13, p. 9194. <https://doi.org/10.3390/su13169194>, 2021.
- [14] M. Zavarkó, A. Imre, G. Pörzse és Z. Csedő, „Past, Present and Near Future: An Overview of Closed, Running and Planned

Biomethanation Facilities in Europe,” *Energies*, 14, p. 5591. <https://doi.org/10.3390/en14185591>, 2021.

- [15] H. Valve, D. Lazarevic és N. Humalisto, „When the circular economy diverges: The co-evolution of biogas business models and material circuits in Finland,” *Ecological Economics*, 185, p. 107025. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107025>, 2021.
- [16] W. Kanda, M. Geissdoerfer és O. Hjelm, „From circular business models to circular business ecosystems,” *Business Strategy and the Environment*, pp. 2814-2829. <https://doi.org/10.1002/bse.2895>, 2021.
- [17] F. B. Agyenim, P. D. Dzamboe, M. Mohammed, S. Bawakyillenuo, R. Okrofu, E. Decker, V. K. Agyemang és E. H. Nyarko, „Powering communities using hybrid solar-biogas in Ghana, a feasibility study,” *Environmental Technology & Innovation*, 19, p. 100837. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100837>, 2020.

A biometán ágazat 2030-ra az EU jelenlegi oroszországi gázimportjának 20%-át fogja tudni szállítani [1].

Az Európai Bizottság rePowerEU című, 2022. március 8-án közzétett közleménye döntő lépés az európai biometán ipar gyors fejlődésében [2]. Európának sürgősen diverzifikálnia kell és csökkentenie kell az orosz gáztól való függőségét, miközben fokoznia kell az éghajlatpolitikai célokra irányuló törekvését. Az ágazat készen áll arra, hogy 2030-ra megvalósítsa az EU által javasolt 35 milliárd köbmétert, és kéri, hogy ezt a célkitűzést építsék be a jelenleg fejlesztés alatt álló megújulóenergia-irányelv (RED III.) átdolgozásába. Az Európai Bizottság, a tagállamok és a biometán értéklánc közötti szoros együttműködésre lesz szükség ahhoz, hogy a mai javaslatokat követően azonnali intézkedéseket lehessen hozni. A biometán termelésének célértéke az Oroszországból származó jelenlegi EU gázimportjának több mint 20%-át teszi ki. 2050-re ez a potenciál háromszorosára, jóval több mint 100 milliárd köbméterre nőhet, és a jövőbeli uniós gázkereslet 30-50%-át is fedezheti.” – magyarázza H. Dekker, az Európai Biogáz Szövetség (EBSz) vezérigazgatója.

Az EBSz az elmúlt években intenzíven dolgozott azon, hogy a fenntartható biometánt alapvető megújuló energiaforrásként elfogadott legyen. Az elmúlt hónapokban ez a munka intenzívebbé vált a fenntartható biometán kezdeményezés keretében, amelyben az EBSz a közös határidős ügyletekkel és a biometán értéklánc képviselőivel együtt tárgyalásokat kezdett az Európai Bizottsággal és a különböző tagállamokkal. A ma bemutatott cél eléréséhez szoros köz- és magánszféra közötti együttműködésre van szükség a vonzóbb tőkebefektetések érdekében. A biometántermelés jelentős növekedése megfizethető és fenntartható energiát biztosít az uniós polgárok számára, és támogatni fogja az uniós gazdaság ellenálló képességét.

„Egyes országok már most is aktívan részt vesznek a biometán gyártás fejlesztésében Európában. Sokan mások most kezdik feltárni ezt a potenciált. A tagállamok összehangolt fellépései kritikus fontosságúak lesznek a skálázható zöld gázzal történő energia-biztonság növelése szempontjából az elkövetkező hónapokban és években.” – hangsúlyozza H. Dekker. A biometán termelők és felhasználók teljes ellátási láncja készen áll arra, hogy a nemzeti és uniós politikai döntéshozók támogatásával továbbra is beruházzon az ágazatba, és megújuló gázt szállítson Európába.

Források:

- [1] <https://www.europeanbiogas.eu/the-biomethane-sector-will-deliver-20-of-current-eu-gas-imports-from-russia-by-2030/>
- [2] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511

A power-to-gas technológia ipari környezetben való tesztelése: egy szennyvíztisztító telepen szerzett K+F tapasztalatok

Dr. habil. Csedő Zoltán

*tanszékvezető egyetemi docens, Budapesti Corvinus Egyetem, Vezetés és Szervezés Tanszék
ügyvezető igazgató, Power-to-Gas Hungary Kft*

A dekarbonizáció és a hidrogéngazdaság felé történő elmozdulás globális, európai és magyarországi kontextusban is stratégiai prioritás. Az ipari léptékű hasznosításra már alkalmas biológiai metanizációs technológia jelentősége a jövő energiaszektorában e két fő trend integrációjában rejlik, ugyanis a power-to-gas (P2G) folyamatban lehetőség nyílik a zöld hidrogén hasznosítási lehetőségeinek kiterjesztésére és a szén-dioxid újrahasonosítására is. Jelen tanulmány a P2G technológia ipari környezetben történő implementációjára fókuszálva elemzi a nemzetközi biometanizációs projektek fejlesztési irányait és egy hazai szennyvíztisztító telepen szerzett kutatási és fejlesztési tapasztalatokat. A nemzetközi tapasztalatok alapján a biometanizációs projektek mennyisége és léptéke is növekvő tendenciát mutat, és a szennyvíztisztító telepeken történő implementáció bevált gyakorlatnak számít. A hazai környezetben szerzett empirikus kutatási eredmények visszaigazolták a nemzetközi jó gyakorlatokat. Jelentős előrelépésnek számít a P2G szakirodalomban, hogy demonstrálásra került egy kismértékben oxigént is tartalmazó, nyers biogázminta hasznosíthatósága a Power-to-Gas Hungary Kft. biometanizációs technológiája által, továbbra is magas szén-dioxid konverzió mellett.

*

Decarbonization and transition towards the hydrogen economy are strategic priorities in the global, European, and Hungarian context. Biological methanation technology, which is already applicable for commercial-scale utilization, means a significant opportunity to integrate these two trends. Power-to-gas (P2G) technology could extend the ways for green hydrogen utilization and reuse carbon dioxide in the process. This study focuses on the implementation of P2G technology in industrial environments. By doing so, the author analyzes the directions of international biomethanation project developments, and the research and development experiences gathered at a Hungarian wastewater treatment plant (WWTP). Based on the international experiences, the number and the volume of biomethanation projects are growing, and implementation at WWTPs seems to be a common practice. Empirical research results from the Hungarian environment validated these international trends. Demonstrating the applicability of the biomethanation technology of Power-to-Gas Hungary Kft. to utilize raw biogas with a small amount of oxygen at a high CO₂-conversion rate means a significant advancement in the P2G research.

Az éghajlatváltozás kezelését célzó Párizsi Megállapodással [1] összhangban a megújuló forrásból származó villamos energia mennyisége jelentősen megnövekedett az utóbbi évtizedekben. Az előrejelzések szerint a globális megújuló villamosenergia-kapacitás

a 2020-as szintről több mint 60%-kal, 4800 GW-ra is nőhet 2026-ra, e mennyiség pedig már megegyezne a globális fosszilis és nukleáris kapacitások mértékével [2]. A globális trendekhez illeszkedve, az Európai Unió 2050-re klímasegességé szeretne válni, és ennek érdekében kiemelt hangsúlyt helyez a hidrogéngazdaság fejlesztésére [3] és a dekarbonizációra is [4]. A megújuló és karbonsemleges villamosenergia-termelés részarányának növelése, illetve a hidrogéngazdaság és a dekarbonizáció kiemelt fontosságú a magyarországi energiaszektor jelenét és jövőjét is meghatározó hazai stratégiákban is, így a 2020-ban publikált „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig” [5] és a 2021-ben publikált „Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája” [6] című dokumentumokban.

E kulcsterületeket tekintve széleskörű az egyetértés a szakirodalomban és az ipari szereplők között az energiatárolás [7, 8, 9], a hálózat-kiegyensúlyozás [10] és a megújuló villamos energiával történő zöld hidrogén-termelés fontosságát tekintve (power-to-hydrogen, P2H) [11, 12]. A hidrogénre épülő, egyéb konverziós power-to-X (P2X) technológiákkal is számos tanulmány foglalkozik [13]. Ennek oka, hogy különösen fontos feladat a zöld hidrogén felhasználási lehetőségeinek kiterjesztése, mivel a hidrogéngazdaság rendszerében – definíció szerint [14] – a hidrogén nagy volumenű termelése mellett hasonlóképp fontos a hidrogén extenzív hasznosítása is. A P2M folyamattal hidrogénből szintetikus földgáz állítható elő, amely gázként és cseppfolyósítva (LNG) is széles körű hasznosítási lehetőséggel rendelkezik [15].

A rövidebb távú energiatárolási megoldásokat (például akkumulátoros rendszereket) kiegészítő power-to-methane (P2M) technológia [16] fő potenciálját a közeljövő energiarendszerében a fentebb említett prioritások integrálása jelenti. Eszerint a metanizációs folyamatban a zöld hidrogénből, illetve – a társadalmi és gazdasági költséget jelentő – szén-dioxidból biometán vagy karbonsemleges szintetikus földgáz (SNG) állítható elő, amely a meglévő gázhálózati infrastruktúrába szinte korlátlan mennyiségben betáplálható [17], ellentétben a részben korlátozások alá eső, illetve új infrastruktúrát és szállítási eszközöket igénylő hidrogénnel [18, 19]. A P2G technológiák a körkörös gazdaságfejlesztés egyik meghatározó kutatási irányához, a biogáz- és biometán-termelési célú alghasznosítás-hoz is kapcsolódnak [20].

A power-to-gas technológiákban rejlik ezen potenciált az EU és Magyarország stratégiai dokumentumai is explicit módon tartalmazzák. Például, az Európai Bizottság „A Clean Planet for All” című dokumentuma megfogalmazza, hogy a fenntartható fűtés és ipari alkalmazások működtetése során kulcsszerepet játszhat a földgázzal kevert hidrogén és az „e-methane”, amelyet megújuló villamos energiából és biogáz keverékből lehet előállítani [21, p. 8]. Az említett hazai energiastratégiai dokumentumok is kifejezik a zöld hidrogén, a biometán és az ezeket előállító power-to-gas technológiák fejlesztésének fontosságát [5, 6]. Fontos ugyanakkor arra

is rámutatni, hogy a klímasemleges jövő felé tartó átmenetben nem lehet figyelmen kívül hagyni a gazdasági versenyképesség szempontjait sem [21, 4], ezért az újabb „cleantech” fejlesztések mellett hasonlóképp fontos immár az ipari környezetben történő alkalmazással, illetve a műszaki kérdések mellett már gazdasági, üzleti és/vagy stratégiai szempontokkal is foglalkozni a tudományos és ipari kutatások során [22, 17]. Következésképp a magyarországi power-to-gas kutatások esetében is érdemes ilyen irányú kutatásokat végezni.

Építve a korábbi elméleti modellekre és empirikus tapasztalatokra, melyek már előirányozták a nagyobb hazai szennyvíztisztító telepek ígéretességét P2G üzemek telepítésére és üzemeltetésére [23, 24], e kutatások egyik elemzési környezete egy ilyen telep lehet. A biogáz üzemmel rendelkező szennyvíztisztító telepek igen ígéretesnek számítanak a P2M implementáció számára a biogázban lévő, hatékonyan hasznosítható szén-dioxid, továbbá a szezonális energiatárolás, hálózat-kiegyensúlyozás, illetve a villamosenergia- és földgázszektor összekapcsolásának („sector coupling”) lehetősége miatt is [25] [26] [27]. Ezen kívül az algahasznosítás nemcsak a biogáztermelés és az erre épülő metanizáció iránya lehet, de léteznek alga alapú szennyvíztisztítási technológiák is [28]. E színergiák ellenére egy-egy szennyvíztisztító telep mint jövőbeli (alga alapú) P2M üzemeltető mélységi elemzésére nem került még sor a szakirodalomban.

Mindezek alapján a tanulmány célja egyrészt, hogy a kereskedelmi méretű hasznosítás stratégiai szempontjait is figyelve elemezze a nemzetközi P2M projektek fejlesztési irányait. Másrészt, sor kerül egy konkrét eset, egy hazai szennyvíztisztító telepnél szerzett saját K+F tapasztalatok ismertetésére is.

Anyagok és módszerek

A nemzetközi K+F tapasztalatok feltárása egy 2016 óta tartó, folyamatos piackutatásra épül, jelen tanulmányban olvasható eredmények pedig a 2021-es állapotot mutatják. A releváns projektek összegyűjtésén túl a projekteírások kvantitatív szövegelemzésére is sor került a JMP nevű szoftver segítségével. A nemzetközi K+F tapasztalatok részben irányt mutattak a hazai kutatási irányoknak, részben visszaigazolták a megkezdett kutatások relevanciáját.

A hazai kutatások a Power-to-Gas Hungary Kft. biológiai metanizációs technológiával működő prototípusára épültek, amelynek jellemzőit és innovativitásának okait korábbi kutatások részletezték, mélységében is vizsgálták (pl. speciális, szelektív robosztus Archea törzs; fluktuációkkal és szennyezőkkel (pl. hidrogén-szulfid) szembeni ellenálló-képesség; alacsony nyomás és hőmérséklet (60-70 °C); átlagosan legalább 96%-os CO₂ konverzió; a teljes folyamat (elektrolízis és metanizáció) határfoka: kb. 55%; robosztusabb rendszer mint a termokatalitikus metanizáció kémiai katalizátorral; érettebb technológia, mint bioelektrokémiai rendszer elektro-aktív mikro-organizmusokkal) [17, 23, 29].

A hazai kutatások másik pillére egy hazai szennyvíztisztító telepnél történt adatgyűjtés volt. A szennyvíztisztító telep bemutatása az eredményekkel együtt, a következő fejezetben olvasható.

A szennyvíztisztító telepek a biológiai metanizáció mellett az alga alapú biogáz- és biometán-termelés számára is ígéretes területeknek számítanak a következő tényezők miatt:

1. A fotoszintetikus biogáz-feljavítás a napenergia felhasználásával a mikroalgák általi CO₂-megkötésen és a H₂S, kén-oxidáló baktériumok által, kénné/szulfáttá történő oxidációján alapul a fotoszintetikus úton előállított oxigén felhasználásával.

A folyamat környezeti és gazdasági fenntarthatóságát fokozza, hogy ez a biotechnológia a szennyvízkezeléshez is hozzájárul, mivel a maradék tápanyagok támogatják az algák/baktériumok növekedését [30].

2. A mikroalgák megkötik a szennyvízben található bakteriális szerves anyagok oxidációja által keletkezett CO₂-t és biztosítják a nitrifikációhoz és szerves anyagok oxidációjához szükséges oxigént. Ez a kettős heterotróf és autotróf növekedés pedig elősegíti a szén és a tápanyagok asszimilációját a vegyes biomasszába, amelyet azután műtrágyaként és/vagy nyersanyagként lehet felhasználni a bioüzemanyagok előállításához. A mikroalga alapú technológia a szakaszos betáplálású eleveniszapos szennyvíztisztító rendszerek energiaszükségletének csak 22%-át igényli és alacsonyabb globális felmelegedési és eutrofizációs potenciállal rendelkezik [31] [28].

Tekintve a körkörös gazdaságfejlesztés és algahasznosítás P2G-hoz kapcsolódó lehetőségeit a szennyvíztisztító telepeken, egy hazai szennyvíztisztítótelep vizsgálata kiemelt figyelmet kaphat a P2G fejlesztés szempontjából.

A nemzetközi szakirodalom és a hazai szennyvíztisztító telepeken szerzett korábbi átfogóbb, saját empirikus tapasztalatok alapján a következő előfeltevések orientálták az adatgyűjtést jelen esettanulmány esetében:

- 1) Alapvető P2G lehetőségeknek számít
 - a. a P2H folyamat tekintetében, hogy napelempark telepítésével zöld hidrogén lokálisan termelhető,
 - b. a P2M folyamat tekintetében, hogy a biogáz szén-dioxid tartalma leválasztás nélkül metanizálható,
 - c. a szektorintegráció (sector coupling) tekintetében, hogy biztosítható a csatlakozás a villamosenergia- és földgáz-hálózathoz.
- 2) Az eddigi hazai kutatási tapasztalatok pedig visszaigazolták a következő lehetőségeket
 - a. Van biogáztermelés a nagyobb hazai telepeknél és kb. 20 MW_{el} P2G telepítési potenciál
 - b. Van szabad terület, megfelelő infrastruktúra P2G telepítéshez
 - c. Van villamosenergia- és földgázhálózatra történő csatlakozási lehetőség
 - d. P2H folyamatból származó oxigén felhasználható lenne a szennyvíztisztítás aerob folyamataiban. [23, 24]

Eredmények

Nemzetközi K+F tapasztalatok ipari környezetben

Nemzetközi biometanizációs projektek

A nemzetközi K+F tapasztalatok kutatása során világossá vált, hogy a Power-to-Gas Hungary Kft. által is fejlesztett biometanizációs technológia esetében a szennyvíztisztító telepek ígéretes telephelynek számítanak. Az 1. táblázat az európai biometanizációs projektek listáját és 2021-es státuszát mutatja. A táblázatból az is látható, hogy a nemzetközi biometanizációs üzemek egy jelentős része szennyvíztisztító telepek mellé kerül(t) telepítésre. Továbbá, a listából az is látható, hogy az elmúlt években több kereskedelmi méretű biometanizációs üzem tervezése vagy fejlesztése is megkezdődött külföldön, hiszen több esetben is már 1 MW_{el} vagy afeletti elektrolizátor teljesítmény került telepítésre.

1. táblázat. Nemzetközi biometanizációs projektek listája és státusza 2021-ben ([17] alapján saját szerkesztés)

Projekt	Ország	Település	Projekt kezdete	Elektrolizátor (MW _{el})	Státusz
PtG-Emden	GER	Emden	2012	0,312	Lezárt
PtG am Eucolino	GER	Schwandorf	2013	0,108	Üzemeltetés alatt
P2G-Foulum Project	DEN	Foulum	2013	0,025	Lezárt
SYMBIO	DEN	Lyngby	2014	-	Lezárt
W2P2G	NL	Wijster	2014	0,400	Üzemeltetés alatt
BioPower2Gas	GER	Allendorf	2015	0,300	Lezárt
GICON-Großtechnikum	GER	Cottbus	2015	-	Üzemeltetés alatt
Energiepark Pirmasens-Winzeln	GER	Pirmasens	2015	1,800	Üzemeltetés alatt
Mikrobielle Methanisierung	GER	Schwandorf	2015	0,275	-
Biogasbooster	GER	Straubing	2015	-	Üzemeltetés alatt
BioCat Project	DEN	Kopenhagen/ Avedore	2016	1,000	Lezárt
Power to Mobility (MicroPyros GmbH)	GER	Weilheim-Schongau	2017	0,250	Fejlesztés alatt
STORE&GO	CH	Solothurn/ Zuchwil	2018	0,350	Lezárt
ORBIT 1st site	GER	Regensburg	2018	-	Lezárt
BIOCO2NVERT	GER	Dörentrop	2018	-	Fejlesztés alatt
HYCAUNAS	FRA	Saint-Florentin	2018	1,000	Fejlesztés alatt
Dietikon Microenergy	CH	Dietikon	2019	2,500	Fejlesztés alatt
ORBIT 2nd site	GER	Ibbenbüren	2020	0,001	Üzemeltetés alatt
INFINITY 1	GER	Pfaffenhofen a. d. Ilm	2020	1,000	Fejlesztés alatt
CarbonATE	AUT és CH	Winterthur	2020	-	Üzemeltetés alatt
Power-to-Gas Hungary üzem	HU	-	-	10,000	Tervezés alatt

Biometanizációs projektek fejlesztési irányai

A nemzetközi K+F tapasztalatok feltárása során a biometanizációs projektleírások kvanitatív szövegelemzésére is sor került (angol nyelven). Az eredmények alapján projektek fókuszja egyre inkább az ipari környezetben elérhető társadalmi-gazdasági előnyök felé tolódik. Az illusztratív példák a következők.

1) A biometanizációs projektleírások leggyakoribb kifejezései-nek megjelenési rátáját vizsgálva a tervezett/implementált üzem mérete szerint az volt látható (1. sz. ábra), hogy

- a. míg a kisebb volumenű projekteknel gyakoribbak voltak például a „hatékonyság”, „folyamat”, „reaktorstruktúra” szavak,
- b. addig nagyobb méretnél már a „megújuló energia”, „mennyiség”, „termelés”, „tárolás” kifejezések domináltak.

2) A projektleírások 75 leggyakoribb kifejezésének klaszterelemzésére is sor került a projektek kezdési dátumai alapján (2. sz.

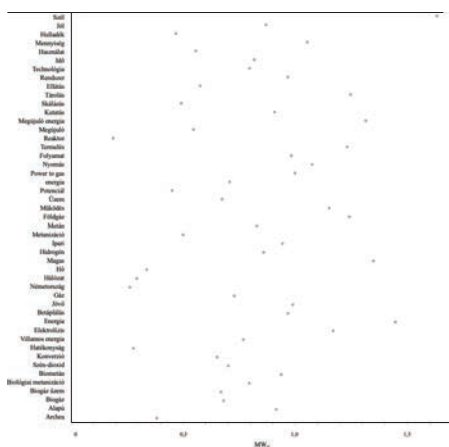
ábra), amelynek eredményei alapján

- a. 2013 és 2017 között inkább a technológiafejlesztés volt hangsúlyos a szövegekben, például a következő kifejezésekkel: „kutatás”, „konverzió”, „pilot”, „indítás”, „feltételek”, „hulladék”;
- b. 2017 óta már inkább a jövőbeli előnyök realizálása került előtérbe, például a „jövő”, „gazdasági”, „klíma”, „zöld metán”, „infrastruktúra” szavak egyre gyakoribb megjelenésével. [17]

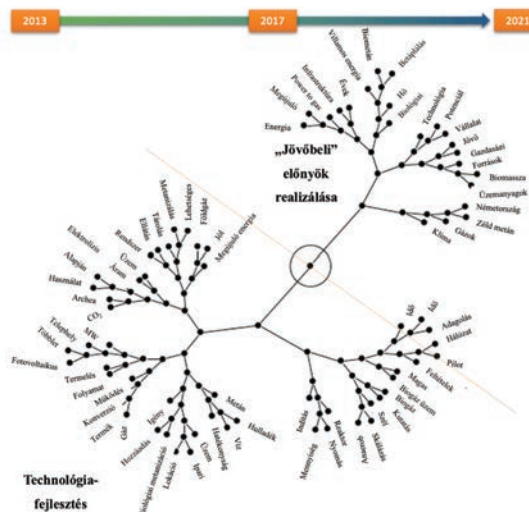
Hazai K+F tapasztalatok ipari környezetben

Elemzési környezet

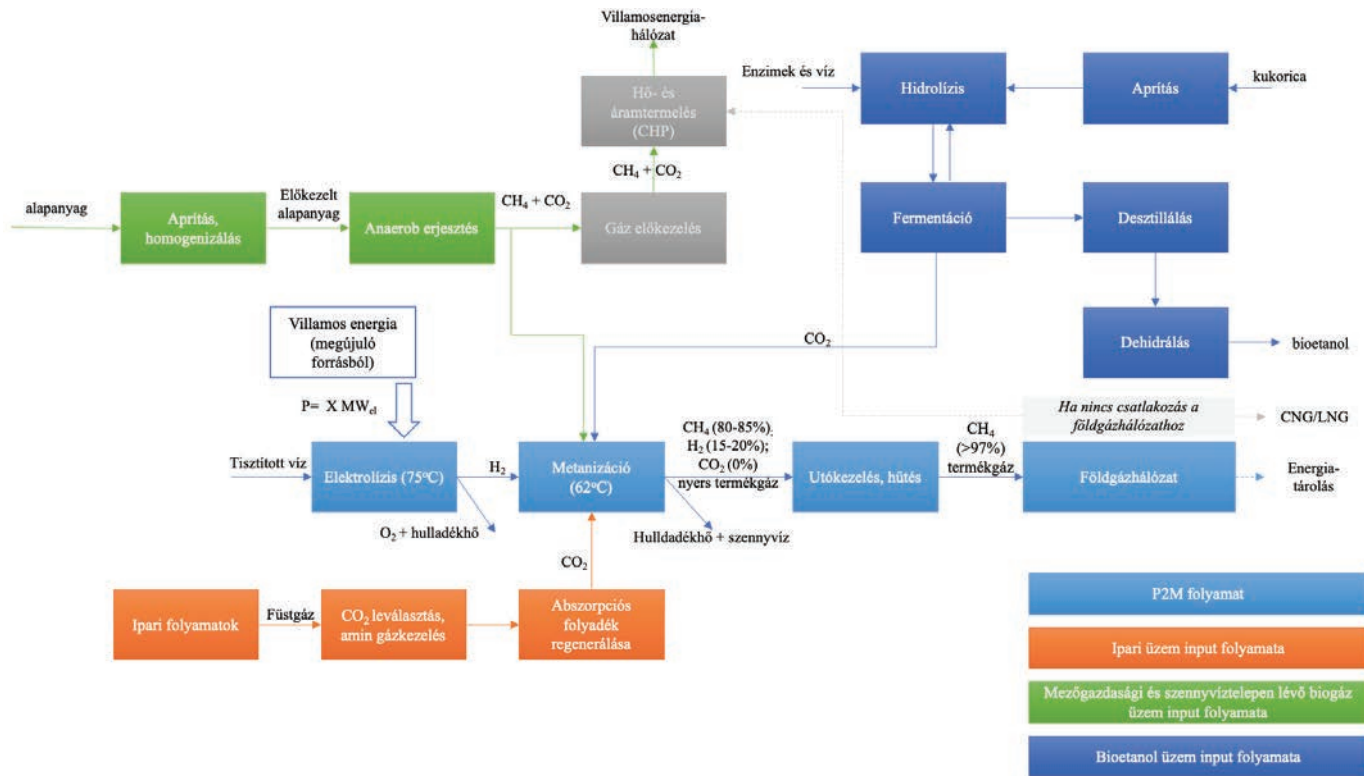
Illeszkedve a nemzetközi trendekhez, az P2G implementáció lehetőségét hazai szennyvíztisztító telepeken is vizsgáltuk az utóbbi 3



1. ábra. Kifejezések megjelenési gyakorisága egy adott elektrolizátor kapacitás esetén a projektleírásokban (MW_{el}) ([17] alapján saját szerkesztés)



2. ábra. A 75 leggyakoribb kifejezés klaszterei a projektek kezdési dátumai alapján ([17] alapján saját szerkesztés)



3. ábra. P2G folyamat különböző telephely típusoknál [22]

évben. A hazai P2G implementációs kutatások 7 db biogáz üzemmel rendelkező szennyvíztisztító telepet, 3 db mezőgazdasági biogáz üzemmel, 2 db bioetanol üzemmel és 2 db füstgáz-kibocsátó iparvállalatot foglaltak eddig magukba. A P2G folyamat sématisztikus ábráját ezen telephely típusoknál a 3. sz. ábra mutatja.

Jelen esettanulmány szempontjából a szennyvíztisztító telepeknél is releváns, zölddel jelölt folyamat került fókuszba, amely szerint a biogáz a biológiai metanizációs reaktorba kerül bevezetésre a megújuló forrásból származó, elektrolízis által megtermelt zöld hidrogénnel együtt. A nyers termékgáz – a várakozások szerint – szén-dioxidot

nem, vagy csak minimális mértékben tartalmazhat, metántartalma 80-85%, hidrogéntartalma 15-20%-os lehet. E hidrogéntartalom egy utókezelési lépésben visszanyerhető, így a földgázhoz egy 97%-nál magasabb metántartalmú biometán táplálható be, komprimálható, cseppfolyósítható vagy elégethető gázmotorban. Az esettanulmány egyik kiemelt célja a nyers termékgáz-összetételre vonatkozó várakozás validálása a szennyvíztisztító telep biogáz üzemében termelt gáz (illetve azzal megegyező gázkeverék) felhasználásával a Power-to-Gas Hungary Kft. prototípusában.

A vizsgált telephely egy „átlagos” hazai, nagyváros mellett elhelyezkedő szennyvíztisztító telep jellemzőivel bír, amelyeket a 2. sz. táblázat mutat be.

2. táblázat. A vizsgált szennyvíztisztító telep jellemzői

Szempont	Jellemző
Tevékenységi kör	Klasszikus víziközmű szolgáltatások: – Ivóvíz-szolgáltatás, Szennyvízelvezetés és -tisztítás, Települési folyékonyhulladék-elszállítás, Vizsgálólaboratórium működtetése – Biogáztermelés a szennyvíztisztító telepen
Infrastrukturális, működési jellemzők	– Kb. 100.000 lakos-egyenérték – Januárban-februárban körülbelül egy hónapos leállás – Egy 250 kWth-os kazánt használnak az üzem kiegészítő fűtésére – Szárítás (bepárlással kb. 50%-kal növelik szárazanyagtartalmat)
Biogáz jelenlegi felhasználása	– Saját célra villamos energia előállítására – A saját energiaszükséglet 50-60%-át fedezi
P2G inputok biztosíthatósága	– Villamos energia, illetve a szennyvízből és az ivóvízből tisztított, demineralizált vízzel biztosítható az elektrolízátor tartós üzem – Biogáztermelés: átlagosan 100 Nm ³ /h és kb. 40% CO ₂ – Szabad terület rendelkezésre állása a telepen

A megtermelt biogáz hasznosíthatóságának vizsgálata

Az üzemlétesítés lehetőségét vizsgálva a biogáz hasznosíthatósága is validálásra került. Ez a technológiai vizsgálat a szennyvíztisztító telepről származó biogáz minta tesztelését foglalta magába, melyben a metán és a szén-dioxid mellett 0-1,5% közötti értékben oxigén is található. A különböző üzemeltetési beállításokkal végzett kísérletek fő eredményeit a 3. táblázat ismerteti.

Az eredmények rámutattak, hogy a biogáz a nemzetközi eredményekkel összhangban hasznosítható és bevezethető a reaktorba anélkül, hogy a szén-dioxidot le kellene választani. Ez azt jelenti, hogy annak ellenére, hogy a mikroorganizmusok alapvetően anaerob környezetben képesek katalizálni a reakciót, a metanizáció a kismértékű oxigéntartalom mellett is végbemegy. Bár a CO₂ konverzió kismértékben romlik, és a CO₂ a termékgázban 1-2% körül marad, a konverzió mértéke többféle módon növelhető, például a hidrogén : szén-dioxid arány megváltoztatásával. Mindezek alapján az az ipari méretű implementációra vonatkozó következtetés fogalmazható meg, hogy a termékgázból a megnövekedett arányú hidrogén visszanyerése szükséges (a zöld hidrogén-betáplálás korlátjainak és értékesítési árának függvényében).

3. táblázat. A keverékgáz különböző kísérleti eredményein alapuló átlagos értékek a gáztermékben

Vizsgálati szakasz	Keverő fordulatszámának módosítása / normál üzem	Gázkeverék dúsítása, fordulatszám növelése	Hőmérséklet változtatásának hatása	Átlagolt eredmények
A legjobb CO ₂ konverzió meghatározó paraméterei	900 min ⁻¹ CO ₂ :H ₂ – 1:4,25 gázáram	900 min ⁻¹ CO ₂ :H ₂ – 1:4,5 gázáram	68 °C 700 min ⁻¹ CO ₂ :H ₂ – 1:4,5 gázáram	Várhatóan legelőnyösebb beállítás: 68 °C 900 min ⁻¹ CO ₂ :H ₂ – 1:4,25-4,5 közötti gázáram
CH ₄ koncentráció átlagos értékei	84,7%	86,9%	87,4%	86,33%
CO ₂ koncentráció átlagos értékei	5,9%	1,2%	0,3%	2,46%
H ₂ koncentráció átlagos értékei	10,2%	11,3%	9,9%	10,46%

Az ipari méretű P2G üzemlétesítés lehetőségei

A P2G üzemek méretét az elektrolizátor névleges teljesítménye alapján jelöli a nemzetközi gyakorlat. Az elektrolizátor kapacitást a hidrogéntermelés szükségessége, a hidrogéntermelés szükségességét pedig a rendelkezésre álló szén-dioxid forrás (39 Nm³/h) és a hidrogén : szén-dioxid arány határozza meg. Utóbbi esetben az elméleti 4:1 arány a gyakorlatban legalább 4,2:1 arányra kerül módosításra (a többletet a hidrogénnek a szén-dioxidnál rosszabb vízben való oldódási képessége indokolja), azonban a keverékgázzal végzett kísérletek eredményei a legjobb szén-dioxid konverziót a 4,25-4,5 közötti intervallumra prognosztizálják. Következésképp a számítások keretében 4,3:1-es H₂:CO₂ arány került alkalmazásra.

Az óránkénti kb. 40 Nm³ CO₂ forrás a biogázban, illetve a fenti kísérleti eredmények a telepíthető P2G üzem elméleti névleges villamoskapacitása 788 kW_{el}. Az elméleti üzem részletes adatait a 4. táblázat mutatja. A számítások alapján 100 Nm³/h biogázból

4. táblázat. Az elméletileg telepíthető legnagyobb P2G üzem fő input és output adatai a vizsgált szennyvíztisztító telepen

	Érték	Mértékegység	Megjegyzés
Elektrolizátor névleges teljesítménye	788	kW _{el}	
Elektrolizátor villamosenergia-felvétele	4,7	kWh/Nm ³ H ₂	
Átlagos H ₂ input	167,6	Nm ³ /h	Az elektrolízisből
Átlagos CO ₂ input	38,9	Nm ³ /h	A biogázból
Átlagos CH ₄ input	61	Nm ³ /h	A biogázból
CH ₄ termelés CO ₂ konverzióval	37	Nm ³ /h	95%-os CO ₂ konverziót figyelembe véve
CH ₄ tartalom a termékgázban	98	Nm ³ /h	
H ₂ tartalom a termékgázban	11,3	Nm ³ /h	
CO ₂ tartalom a termékgázban	2,6	Nm ³ /h	
Átlagos O ₂ termelési kapacitás	83,8	Nm ³ /h	Az elektrolízis mellékterméke
Hulladék hő	268	kWh/h	Az elektrolízis és a metanizáció mellékterméke

(38,9%-os CO₂ és 61%-os CH₄ tartalom esetén) 98 Nm³/h biometán lenne termelhető.

A vizsgált telephely biogáztermelési adatai, a kísérletek és a számítások alapján tehát egy – a nemzetközi projektek alapján – közepes méretűnek számító P2G üzem lenne telepíthető, a gyakorlatban egy 750 kW_{el} teljesítményű elektrolizátor általi hidrogéntermeléssel. A 4. sz. ábra nemzetközi összehasonlításban mutatja a lehetséges üzemméretet (szaggatott vonallal).

Stratégiai prioritások

A szennyvíztisztító telep stratégiai lehetőségeit és prioritásait vizsgálva két kiemelt téma merült fel: a biometán hasznosíthatósága és a körkörös gazdaság fejlesztésének célja. A két téma össze is kapcsolódik, ugyanis a biometán preferált felhasználási módja a



4. ábra. A lehetséges P2G üzem mérete a vizsgált szennyvíztisztító telepnél (750 kW_{el}, szaggatott vonallal), nemzetközi kontextusban

felsővezetés számára a saját energiaigény nagyobb arányú fedezése lenne a biometán elégetésével. Amennyiben biometán értékesítési lehetőségei (tovább) javulnak, például a piaci ár növekedése vagy egy kötelező átvételi rendszer bevezetése miatt, a földgázhálózatba történő betáplálás is jövedelmező opció lehet.

A helyszíni feltételek alapján a P2G implementáció tudná támogatni a telep azon stratégiai célját, hogy a körkörös gazdaságban központi szerepet töltsön be. A szakirodalom alapján a körkörös gazdaság feltételei a csökkentés, újrahasonosítás és a rendszer szintű váltás tartozik [32], melyek mindegyike teljesíthető. Például csökkenthető a CO₂ kibocsátás a biogáz szén-dioxid tartalmá-

nak konverziójával; a P2G üzem hulladékhojje felhasználható lehet a szárításhoz vagy az üzem fűtésére; illetve megvalósulhat a villamosenergia- és földgázrendszerek összekapcsolása, amely újfajta rendszerintegrációt jelent. A melléktermékként keletkező oxigén nyomáscsökkentés után felhasználható a szennyvíztisztáshoz, azonban ez szintén infrastrukturális beruházást igényelne.

Konklúzió

A tanulmány a power-to-gas technológia ipari környezetben való tesztelésére fókuszálva nemzetközi és hazai K+F tapasztalatokat mutatott be és elemzett. A nemzetközi K+F tapasztalatok alapján a biometanizációs projektek száma és léptéke is növekszik, és az ipari környezetben történő társadalmi-gazdasági előnyök felé tolódik K+F tevékenységek fókuszja. A nemzetközi és az eddigi hazai kutatások egyaránt rámutattak, hogy a szennyvíztisztító telepek ígéretes telephelyek lehetnek a biometanizációs P2G üzemek telepítésére, mely feltevés egy konkrét telephely infrastrukturális adottságait és biogáztermelését mélységében elemezve alátámasztásra került.

A kutatás során megállapítást nyert, hogy a vizsgált, hazai szinten átlagos nagyvárosi méretű szennyvíztisztító telepnél kereskedelmi méretű, nemzetközi kontextusban közepes méretű P2G üzem lenne telepíthető. Fontos előrelépést jelent a hazai P2G kutatások területén az az eredmény, hogy demonstrálásra került a metanizáció – alapvetően anaerob környezetben működő – biológiai katalizátorának robusztussága és szén-dioxid konverziós hatékonysága olyan gázkeverék (biogáz) betáplálása esetén is, amely kismértékben oxigént tartalmaz.

Az ígéretes műszaki eredmények mellett a P2G implementáció a vizsgált szennyvíztisztító telep mint potenciális P2G üzemeltető stratégiai szempontjaihoz is illeszkedik, ugyanis támogatja a körkörös gazdaság fejlesztésére vonatkozó törekvéseket és a biometán több módon is hasznosítható lehet (saját energiaigény nagyobb arányú fedezése, betáplálás a földgázhálózatba és értékesítés). E stratégiai szempontok irányt mutatnak a következő kutatásoknak is. Ezek egy olyan integrált rendszer műszaki-gazdasági életképességét vizsgálhatják, amely egy körforgásos modellben már nemcsak a megújuló villamosenergia-termelést, a P2G-t, a biogáztermelést és a szennyvíztisztítást kapcsolja össze, hanem a legújabb kutatási irányoknak megfelelően – az algatermesztés, az alga alapú biogáz- és biometán-termelés, illetve szennyvízkezelés lehetőségeit is figyelembe veszik.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton mond köszönetet a Kutatás-fejlesztési és Innovációs Állami Tőkealapkezelő Zrt. / Hiventures Zrt., valamint a Vértesi Erőmű Zrt. számára a K+F+I tevékenységek megvalósításának támogatásáért.

Készült a 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 azonosítójú, „Alga biomaszból előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások” című projekt keretében.

Hivatkozásjegyzék

- [1] ENSZ, „Paris Agreement,” 2015. [Online]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. [Hozzáférés dátuma: 03 01 2022].
- [2] IEA, „Renewables 2021 Analysis and forecast to 2026,” International Energy Agency, December, 2021.
- [3] Európai Bizottság, „A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” Brussels, 8.7.2020, 2020.
- [4] Európai Bizottság, „The European Green Deal - COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS,” 11.12.2019, Brussels, 2019.
- [5] ITM, Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig, Január, 2020.
- [6] ITM, „Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája - STRATÉGIA A TISZTA HIDROGÉN ÉS HIDROGÉNTÉCHNOLÓGIÁK HAZAI BEVEZETÉSÉRE ÉS A HIDROGÉNIPAR HÁTTÉRBAZISÁNAK MEGTEREMTÉSÉRE,” május, 2021.
- [7] H. Lund, P. A. Østergaard, D. Connolly, I. Ridjan, M. B. V., F. Hvelplund, J. Z. Thellufsen és P. Sorknæs, „Energy Storage and Smart Energy Systems,” *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 11, pp. 3-14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.21>, 2016.
- [8] G. Pintér, „The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries—A Case Study,” *Energies*, 13 (23), p. 6408. <https://doi.org/10.3390/en13236408>, 2020.
- [9] K. Kummer és A. R. Imre, „Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 14, p. 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>, 2021.
- [10] H. Zsiborács, G. Pintér, A. Vincze, Z. Birkner és N. Hegedűsné Baranyai, „Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting,” *Energy Reports*, 7, pp. 3805-3818. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.007>, 2021.
- [11] IRENA, „Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.50C Climate Goal,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi., 2020.
- [12] M. Zavarkó, „Power-to-gas, hálózatos innovációmenedzsment és versenyképesség a magyar energiaszektorban,” *Energia-gazdálkodás*, 61 (különszám), pp. 15-21, 2021.
- [13] Z. Csedő, M. Zavarkó, B. Vaszkun és S. Koczás, „Hydrogen Economy Development Opportunities by Inter-Organizational Digital Knowledge Networks,” *Sustainability*, 13, p. 9194. <https://doi.org/10.3390/su13169194>, 2021.
- [14] J. O. Abe, A. P. I. Popoola, A. E. és O. M. Popoola, „Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (29), pp. 15072-15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>, 2019.
- [15] A. Imre, R. Kustán és A. Groniewsky, „Thermodynamic Selection of the Optimal Working Fluid for Organic Rankine Cycles,” *Energies*, 12, p. 2028. <https://doi.org/10.3390/en12102028>, 2019.
- [16] M. Sterner és M. Specht, „Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept,” *Energies*, 14, p. 6594. <https://doi.org/10.3390/en14206594>, 2021.
- [17] M. Zavarkó, A. Imre, G. Pörzse és Z. Csedő, „Past, Present and Near Future: An Overview of Closed, Running and Planned Biomethanation Facilities in Europe,” *Energies*, 14, p. 5591. <https://doi.org/10.3390/en14185591>, 2021.
- [18] Z. I. Messaoudani, F. Rigas, M. D. B. Hamid és C. R. C. Hassan, „Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogentransmission via natural gas grid: A critical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (39), pp. 17511-17525. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.171>, 2016.

- [19] D. Haeseldonck és W. D'haeseleer, „The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (10-11), pp. 1381-1386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.018>, 2007.
- [20] D. M. Wall, S. McDonagh és J. D. Murphy, „Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy,” *Bioresource technology*, 243, pp. 1207-1215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.115>, 2017.
- [21] Európai Bizottság, „A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy - COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOC,” 28.11.2018, Brussels, 2018.
- [22] G. Pörzse, Z. Csedő és M. Zavarkó, „Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 14 (8), p. 2297. <https://doi.org/10.3390/en14082297>, 2021.
- [23] Z. Csedő, B. Sinóros-Szabó és M. Zavarkó, „Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 13 (18), p. 4973. <https://doi.org/10.3390/en13184973>, 2020.
- [24] Z. Csedő, „A power-to-gas technológiafejlesztés tapasztalatai Magyarországon,” *Energiagazdálkodás*, 61 (5-6), p. 16, 2020.
- [25] S. Michailos, M. Walker, A. Moody, D. Poggio és M. Pourkashanian, „A techno-economic assessment of implementing power-to-gas systems based on biomethanation in an operating waste water treatment plant,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), p. 104735. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104735>, 2021.
- [26] M. Schäfer, O. Gretzschel és H. Steinmetz, „The Possible Roles of Wastewater Treatment Plants in Sector Coupling,” *Energies*, 13(8), p. 2088. <https://doi.org/10.3390/en13082088>, 2020.
- [27] A. Buttler és H. Spliethoff, „Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2440-2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>, 2018.
- [28] N. Kohlheb, M. van Afferden, E. Lara, Z. Arbib, M. Conthe, C. Poitzsch, T. Marquardt és M. Y. Becker, „Assessing the life-cycle sustainability of algae and bacteria-based wastewater treatment systems: High-rate algae pond and sequencing batch reactor,” *Journal of environmental management*, 264, p. 110459. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110459>, 2020.
- [29] M. Bailera, P. Lisbona, L. M. Romeo és S. Espatolero, „Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 292- 312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>, 2017.
- [30] M. del Rosario Rodero, R. Lebrero, E. Serrano, E. Lara, Z. Arbib, P. A. García-Encina és R. Muñoz, „Technology validation of photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale algal-bacterial photobioreactor,” *Bioresource technology*, 279, pp. 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.110>, 2019.
- [31] P. G. Scarcelli, G. Ruas, R. Lopez-Serna, M. L. Serejo, S. Blanco, M. Á. Boncz és R. Muñoz, „Integration of algae-based sewage treatment with anaerobic digestion of the bacterial-algal biomass and biogas upgrading,” *Bioresource Technology*, 340, p. 125552. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125552>, 2021.
- [32] J. Kirchherr, D. Reike és M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resources, Conservation and Recycling Volume*, 127, pp. 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>, 2017.
- [33] K. M. Morsy, M. K. Mostafa, K. Z. Abdalla és M. M. Galal, „Life Cycle Assessment of Upgrading Primary Wastewater Treatment Plants to Secondary Treatment Including a Circular Economy Approach,” *Air, Soil and Water Research*, 13, p. 1178622120935857. <https://doi.org/10.1177/1178622120935857>, 2020.
- [34] M. Smol, C. Adam és M. Preisner, „Circular economy model framework in the European water and wastewater sector,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>, 2020.
- [35] M. Qadir, P. Drechsel, B. Jiménez Cisneros, Y. Kim, A. Pramanik, P. Mehta és O. Olaniyan, „Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source,” *Natural resources forum*, 44(1), pp. 40-51. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>, 2020.
- [36] M. Donner, R. Gohier és H. de Vries, „A new circular business model typology for creating value from agro-waste,” *Science of the Total Environment*, 716, p. 137065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137065>, 2020.



A power-to-gas technológia potenciális szerepe a visegrádi országok naperőműveinek menetrendtartásában

dr. Pintér Gábor, Kondor Dóra, Hegedűsné dr. Baranyai Nóra*, dr. Vincze András, dr. Zsiborács Henrik

Pannon Egyetem, Környezetgazdaság Egyetemi Központ, Nagykanizsa, Megújuló Energiaforrások Kutatócsoport

*baranyai.nora@uni-pen.hu

A klímavédelmi intézkedéseknek köszönhetően folyamatosan nő a megújuló energiaforrások aránya a világ országainak energiamixében. Ezen megújulóenergia-technológiák leg többjének energiatermelése azonban erősen időjárásfüggő, így a villamosenergia-rendszereknek komoly kihívásokkal kell szembenézniük az ellátásbiztonság további fenntarthatósága érdekében. Jelen kutatás középpontjában a Visegrádi országok (Lengyelország, Csehország, Szlovákia és Magyarország) fotovillamos energia-termelése, ezen belül egy kulcsfontosságú terület, a menetrendtartás, illetve a menetrendtartás problémáinak egy újszerű, power-to-gas technológián alapuló megoldási lehetősége áll. A megoldás potenciális alkalmazhatóságának vizsgálata során fontos szerepet kapott a napon belüli előrejelzések és a tényleges napelemes energiatermelés közötti különbségek vizsgálata, melyek összevetése fontos következtetések levonását teszi lehetővé.

*

As part of the global efforts to fight climate change, the use of renewable energy sources is becoming increasingly common all around the world. Most of these technologies, however, are weather-dependent, so electricity systems have to face considerable challenges in order to ensure the security of energy supply. This article examines the Visegrad countries' (Poland, Czech Republic, Slovakia and Hungary) photovoltaic energy production with a special emphasis on the problems of keeping power generation schedules and a novel solution, based on power-to-gas technology. An important part of the investigation of the potential use of this new solution was the study of the differences between the real photovoltaic power generation and the intraday forecasts in the examined countries. Based on the results of the comparisons, it is possible to make suggestions with a view to making their electricity systems more balanced.

Ahogy a világ jelentős részének, az Európai Unió energiastratégiájának is részét képezi a károsanyag-kibocsátás csökkentése, a fenntarthatóság és a megújuló energiaforrások részarányának növelése [1-4]. Egyes forgatókönyvek 2040-re 40-60%-os fotovillamos és szélenergia részarányt jósolnak, míg más forgatókönyvek szerint 2050-re a primer energiaellátásnak akár 85%-a is származhat megújuló energiaforrásokból. Abban azonban a legtöbb előrejelzés megegyezik, hogy a megújulók részaránya jelentősen növekedni fog az elkövetkező években [5-7].

Annak érdekében, hogy a villamosenergia-rendszer továbbra is megbízhatóan működjön elengedhetetlen, hogy az kellően ru-

galmas legyen, alkalmazkodva az időjárásfüggő megújuló energiaforrások használatához. Erre a legkézenfekvőbb megoldás az energiátárolás, amelyet ugyan eddig is alkalmaztak már, de a villamosenergia-rendszer fenntarthatósága érdekében elengedhetetlen, hogy a jövőben még sokkal nagyobb mértékben terjedjen el az időjárásfüggő megújuló energiaforrásokkal együtt [8,9].

Az egyik megoldási lehetőség az úgynevezett Power-to-Gas technológia, melynek lényege, hogy villamos energia segítségével valamilyen gázt (például hidrogént vagy metánt) állítanak elő [10]. Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások esetében ez a megoldás azért is hasznos, mert a villamosenergia-rendszerben jelentkező túlermelés esetén a megújuló energiaforrásokból származó energiából történő gáztermelés jó alternatívája az ún. leterhelésnek. Az azonban, hogy melyik technológiát érdemes szabályozásra használni egy-egy konkrét esetben elsősorban az adott ország energetikai sajátosságaitól függ.

A visegrádi országok PV termelése

Ahogy világszerte mindenütt, úgy a visegrádi országokban is egyre nagyobb szerepet töltenek be a naperőművek az energiatermelésben. Például Lengyelország esetében, míg 2015-ben mindössze 14 MW beépített PV kapacitás volt az országban, 2021-re már a 3000 MW-ot is túllépte ennek mértéke [11]. Földrajzi adottságai alapján a legnagyobb PV potenciállal Szlovákia és Magyarország rendelkezik a négy ország közül [12].

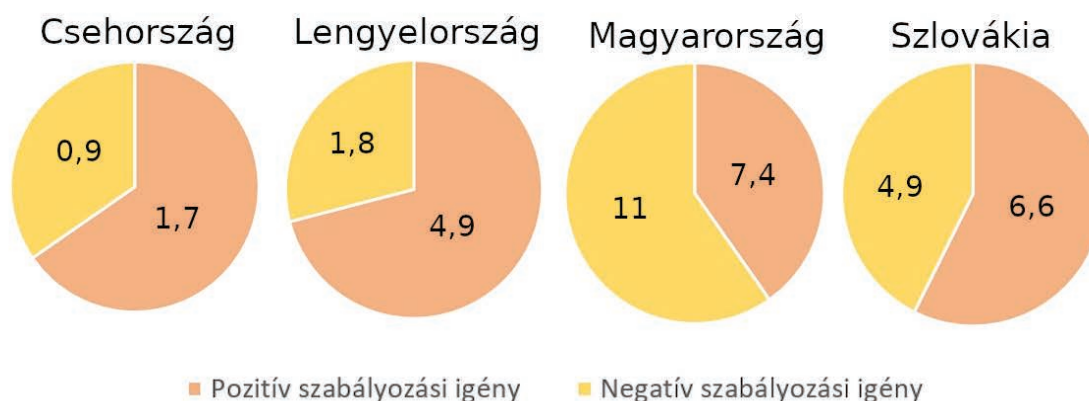
Jelen tanulmány egy év (2019. 09. 01.-től 2020. 08. 31.-ig) tényleges energiatermelését és előrejelzéseit hasonlította össze az ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) és a MAVIR adatbázisainak adatai alapján. Ennek keretében a napon belüli előrejelzések kerültek vizsgálatra. Ahol volt rá lehetőség, ott 15 perces előrejelzés került rögzítésre, ahol nem volt ilyen elérhető adat, ott a 60 perces. Így Csehország és Szlovákia esetében a 60, Lengyelország és Magyarország esetében pedig a 15 perces előrejelzések adatai kerültek feldolgozásra.

A kutatás legfontosabb eredménye, hogy bemutatja a naperőművek menetrendtartása miatt szükséges pozitív és negatív szabályozási igényeket az adott országokban. Ezen adatok szükségesek a menetrendtartáshoz leginkább megfelelő szabályozási technológia kiválasztásához, vagyis a naperőművek energiatermelése és a termelési előrejelzés közti lehető legkisebb eltérés eléréséhez. A lehető legpontosabb előrejelzés kiemelten fontos, hiszen az előírások szerint minden termelő felelős a villamosenergia-rendszerben miatta létrejövő kiegyensúlyozatlanságért [13].

A megfigyelt PV kapacitásokat a vizsgált időszak első és utolsó napján az 1. táblázat mutatja. Lengyelország vonatkozásában csak 2020 májusától állnak rendelkezésre adatok, ezért ennél az országnál 4 hónap a vizsgált időszak.

Megfigyelések időpontja	Csehország	Lengyelország	Magyarország	Szlovákia
2019.09.01.	2054 MWp	nincs adat	1013 MWp	409 MWp
2020.08.31.	2061 MWp	1928 MWp	1129 MWp	450 MWp

Forrás: [11], [14]



1. ábra. A visegrádi országok PV termeléséből származó összesített szabályozási igények 2019. 01. 09. és 2020. 08. 30. között, GWh mértékességben

Eredmények

Az országokban keletkezett pozitív és negatív szabályozási igények összehasonlíthatósága érdekében azokat fajlagosítani kellett. Jelen kutatásban ehhez a 100 MWp érték került kiválasztásra. Az első ábrán a 100 MWp-re vetített éves pozitív és negatív szabályozási igények láthatók. A diagramokon feltüntetett értékek GWh-ban értendők.

A PV naperőművek esetében a pozitív szabályozási igény alatt azt értjük, hogy az előrejelzések felülbecsülték a fotovillamos energiatermelést, míg a negatív szabályozási igény alatt pedig azt, hogy a naperőművek több energiát termeltek, mint az előrejelzésben megállapított mennyiség. A pozitív és negatív szabályozási igény különbsége megmutatja, hogy az adott országban milyen irányú szabályozási igény a domináns. Ez a különbség (lényegében egy maradvány érték) megmutatja, hogy mekkora az a villamosenergia-mennyiség, amit az adott országban már biztosan nem lehet pusztán energiatárolással (például akkumulátorok segítségével) megoldani [15]. Abban az esetben, ha a különbség pozitív, akkor maradvány felirányú szabályozási szükségletről, míg, ha a különbség negatív, úgy maradvány leirányú szabályozási szükségletéről beszélünk a PV technológia vonatkozásában (a maradvány felirányú szabályozási szükséglet a rendszerben a leadott menetrendhez képest energiahiányt, míg a maradvány leirányú szabályozás a leadott menetrendhez képest energiatöbbletet jelent). Eredményeink alapján Lengyelország esetében a pozitív és negatív szabályozási igény különbsége +2,7 GWh, Csehországban +0,8 GWh, Szlovákiában +1,6 GWh, míg Magyarországon -3,6 GWh volt.

A legtöbb országban a naperőművek menetrendtartásának biztosítása inkább felszabályozási igényt idézett elő (tehát többször volt túlzó a menetrend a tény energiatermeléshez képest). Azt azonban fontos kiemelni, hogy Magyarországon nagyobb arányban volt jelen a negatív szabályozási igény (vagyis a hazai menetrendekben inkább a termelés alulbecslése volt a jellemző a tény energiatermeléshez képest): 11 GWh 100 MWp-re vetítve.

Abban az esetben, amikor a pozitív és negatív szabályozási igény közel egyenlő, vagy nagyobb igény van a pozitív szabályo-

zásra, akkor az egyik legjobb megoldás az akkumulátoros (pl. Li-ion vagy NaS) energiatárolás alkalmazása [16-18].

Magyarország esetében a vizsgált időszakban az előre leadott menetrendhez képest összességében többletenergia került a rendszerbe a naperőművek által, melynek költségét elsősorban a menetrendcsoportok viselték. Logikus módon merül fel tehát ezen „felesleges” energiamennyiség hasznosításának az igénye. A korábban már említett Power-to-Gas technológia erre jelentene megfelelő megoldást. A többletként jelentkező elektromos energiát akár metán előállítására is alkalmazni lehetne, így az nem veszne kárba, hiszen a metánná átalakított „felesleges” villamos energia tárolására, illetve hasznosítására kiválóan megfelelne az európai viszonylatban is kiemelkedő, jól kiépített hazai földgáz-infrastruktúra. A jelentős hazai földgáztároló kapacitásnak köszönhetően az energiának akár a szezonális tárolására is lehetőség nyílhatna.

A vizsgált időszakban Magyarországon összesen 40 644 MWh energiatöbblet került a rendszerbe 1129 MW PV kapacitás mellett. Power-to-Gas technológia alkalmazásával ebből az energiamennyiségből mintegy 2 085 679 Nm³ szintetikus metánt lehetne előállítani [19]. Ezt többféle módon is fel lehetne használni a földgázrendszerbe való direkt betápláláson kívül is. Ezen mennyiség felhasználásával például lehetséges volna a mezőgazdaságból származó hasznosítatlan biogáz metántartalmának növelése. Legalább 60%-os metántartalom mellett már gázmotorokban is fel lehetne használni a biogázt, aminek eléréséhez a 98%-os metántartalmat biztosítani képes Power-to-Gas technológiával előállított szintetikus metán egy jó alternatíva. A számított mennyiséggel közel 4 millió Nm³ 40%-os metántartalmú biogázt lehetne 60%-ra dúsítani. Ez az ország számára nem csak energiatudatosság szempontjából lenne fontos, hanem gazdasági előnyökkel is járna.

Konklúzió

Napjainkban a fenntartható fejlődés és az energiapolitikai célok eléréséhez nélkülözhetetlen az energiaipar átalakítása. Jelen tanulmány a visegrádi országokban folyó fotovillamos energiatermelést és az ahhoz tartozó szabályozási igényeket és a Power-to-Gas

technológia alkalmazásának lehetőségét vizsgálta. Az eredmények azt mutatták, hogy a vizsgált országok túlnyomó többségében a naperőművek menetrendtartásához felirányú szabályozás, vagyis energiatöbblet szükséges. Magyarország esetében azonban a negatív szabályozási igény volt nagyobb mértékű a vizsgált időszakban. Ebből az következik, hogy alapvetően van olyan „felesleges” energiamennyiség a hazai villamosenergia-rendszerben, amit érdemes hasznosítani, erre pedig kiváló lehetőség a Power-to-Gas technológia. Fontos azonban megjegyezni, hogy az elmúlt évek tapasztalatai alapján a napelemes rendszerek beépített kapacitása minden országban folyamatosan növekszik, ahogy ez elmondható a többi, időjárástól függő megújuló energiaforrásról is. Ebből adódik, hogy Magyarország mellett a többi ország esetében is érdemes lehet e technológia alkalmazásának lehetőségét megfontolni, hiszen ez hozzájárulhat a megtermelt energia optimálisabb felhasználáshoz.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció elkészítését a 2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00006 és a 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 projektek támogatták.

Irodalom

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Renewables 2019 Global Status Report - REN21; Paris, France, 2019;
- [2] European Commission: 2030 climate & energy framework
- [3] European Parliament: general principles.
Online elérhető: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/68/energy-policy-general-principles> (Hozzáférve: 2022. 01. 28.)
- [4] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures; 2012; Vol. 1;
- [5] BloombergNEF: New Energy Outlook 2021
- [6] ENTSO-E. TYNDP 2018 - Scenario Report.
- [7] Jacobson, M.Z.; Delucchi, M.A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy 2011, 39, 1154–1169, doi:10.1016/J.ENPOL.2010.11.040.
- [8] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures; 2012; Vol. 1.;
- [9] Cochran, J.; Bird, L.; Heeter, J.; Arent, D.J. Integrating Variable Renewable Energy in Electric Power Markets: Best Practices from International Experience; Oak Ridge
- [10] Blanco, H.; Faaij, A. A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 81, 1049–1086, doi:10.1016/J.RSER.2017.07.062.
- [11] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) ENTSO-E Transparency Platform.
- [12] Solargis.com. Solar resource maps and GIS data for 200+ countries.
- [13] EUR-Lex - 32019R0943 - EN - EUR-Lex
Online elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0943> (Hozzáférve: 2022.01.23.).
- [14] Hungarian Transmission System Operator - MAVIR ZRt. PV power generation, estimation and fact data.
- [15] Zsiborács, H.; Pintér, G.; Vincze, A.; Birkner, Z.; Hegedűsné Baranyai, N. Grid balancing challenges illustrated by two Eu-

ropean examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting. Energy Reports, 2021, Vol. 1.; 3805-3818, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.007>

- [16] Aneke, M.; Wang, M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Appl. Energy 2016, 179, 350–377, doi:10.1016/J.APENERGY.2016.06.097.
- [17] Hesse, H.; Schimpe, M.; Kucevic, D.; Jossen, A. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Energies 2017, 10, 2107, doi:10.3390/en10122107.
- [18] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Renewable Electricity Generation and Storage Technologies; 2012
- [19] Pintér, G. The potential role of power-to-gas technology connected to photovoltaic power plants in the Visegrad countries – a case study

Power-to-Gas mintaprojekt Nagykanizsán

A Pannon Egyetem (konzorciumvezető), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és a Délzalai Víz- és Csatornaművek Zrt. konzorcium támogatási kérelmet nyújtott be a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalhoz a 2020-3.1.2-ZFR-KVG kódszámú, „KARBONMENTES, TÖBBLET VILLAMOS ENERGIA INNOVATÍV TECHNOLÓGIA ÁLTAL GÁZENERGIÁVÁ (HIDROGÉN, BIOMETÁN) TÖRTÉNŐ ALAKÍTÁSÁT CÉLZÓ FEJLESZTÉSEK MEGVALÓSÍTÁSA” című pályázati felhívásra.

A „Power-to-Gas – Szezonális energiatárolásra alkalmas metanizáló berendezés fejlesztése” című 2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00006 azonosító számú támogatási kérelmet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásra érdemesnek minősítette.

A projekt keretében egy olyan, a körforgásos gazdasági modellbe illeszkedő, power-to-gas berendezés megépítését és működtetését tervezzük, amely a nagykanizsai szennyvíztelepen a képződő biogáz metán tartalmának dúsítására képes; az így előállított gázt, az országban egyedülálló módon, a helyi földgázhálózatba táplálják be. A berendezés két fő részből áll: egy elektrolizátorból, ami villamos energia segítségével vízbontás során hidrogént és oxigént állít elő, valamint egy metanizálóból, ami a keletkező hidrogénből és a biogázban jelenlevő, korábban fel nem használt, széndioxidból metánt állít elő.

A projektben együttműködő konzorciumi partnerek munkájának együttes eredménye által létrejövő beruházás a villamos energia felhasználásával a naperőművek által okozott csúcsterhelés leszabályozási képességét is vizsgálja, ezáltal lehetőséget biztosítva a ma megtermelt és pillanatnyilag felesleges energiának a hazai földgázhálózatban történő hosszú távú, akár szezonális eltárolására. A projekt sikeres kivitelezése esetén a fentiekén túl a tudományos eredmények alapjául szolgálhatnak további állami és Európai Unió forrásallokációknak.



Alga biomassából power-to-gas technológiával előállított biometanizációs folyamat műszaki feltételei

Dr. Sinóros-Szabó Botond

műszaki igazgató

Az Európai Unió prioritásként kezeli a klímasemlegességi stratégiák és korszerű energiaszerkezeti átállás megvalósulását. A célokat szolgáló egyik lehetséges megoldása az alga biomasszából előállított biogáz power-to-gas (P2G) biometanizációs technológia alkalmazásával történő feljavítása lehet. A magyar-indiai együttműködésben megvalósuló projektben az indiai fél szolgáltatja a biogáz összetételre vonatkozó adatokat. A Power-to-Gas Hungary Kft. laborméretű P2G prototípusával végzett mérések biztosították az elemzéshez szükséges adatokat. A mérési sorozatok átölelték a legfontosabb üzemeltetési scenáriókat (melegindítás, normál üzem, fordulatszám módosítása, keverékarány módosítása és hőmérséklet hatása). A termék-gázban mért CH_4 , CO_2 és H_2 koncentrációk elemzését követően bebizonyosodott, hogy a *Methanothermobacter Thermautotrophicus* archea törzset tartalmazó biokatalizátor alkalmas az adott összetételű biogáz magas szén-dioxid konverziós rátával történő biometanizációra. A hatékony biometán előállításához hidrogénben dúsabb gázkeveréket, magasabb keverőtengely fordulatszámot és hőmérsékletet kell alkalmazni, mint a tiszta szén-dioxidot alkalmazó referenciamérések esetében.

*

The European Union gives particular priority to the implementation of climate-neutral and clean energy transition strategies. The power-to-gas (P2G) biomethanization technology is considered as one of the possible solutions for upgrading biogas produced from algae biomass. Considering the workstreams of Hungarian-Indian bilateral cooperation project, the Indian side has provided data on the composition of biogas using microalgae biomass. The data necessary for the analysis series of measurements has been performed by the experts of Power-to-Gas Hungary Kft. using a laboratory-sized P2G benchtop prototype. The series of measurements have covered the most important operating scenarios (warm start, normal/nominal operation, agitator RPM change, composition change and temperature increase/decrease). After the analysis of the CH_4 , CO_2 and H_2 composition gas concentrations measured in the product gas, it was proved that the biocatalyst containing *Methanothermobacter thermautotrophicus* archea strain is suitable for the biomethanization of biogas with a high carbon dioxide conversion rate. The efficient biomethane production and carbon dioxide conversion is facilitated by hydrogen-rich gas ratio, high agitator shaft speed and the higher reactor temperature than in the case of the reference measurements using pure carbon dioxide gas as feedstock.

Kulcsszavak: Power-to-gas, biológiai metanizáció, alga biomassza, ipari kutatás-fejlesztés.

Keywords: Power-to-gas, biological methanation, microalgae biomass, industrial research and development

Az éghajlatváltozás által okozott problémák kezelésének feladatait az Európai Unió egyik kiemelt prioritása. Az Európai zöld megállapodás (European Green Deal) [1] stratégiájának egyik alappillére a tiszta energiára való átállás, amely a megújuló energiaforrások kiaknázásának támogatása érdekében jobban integrált hálózatok kiépítését, az innovatív technológiák és a korszerű infrastruktúrák térnyerésének előmozdítását, valamint a gázágazat dekarbonizációját tűzte ki célul. A 2009/28/EK ún. „RED I” irányelv [2] 2020-ra 20%-os megújuló részarányt írt elő az Európai Unió teljes energiafogyasztásából, amelyet az azt felváltó, a 2018 végén hatályba lépett, 2018/2001/EU (RED II) irányelv [3] 32%-ra emelt meg. Az uniós célokat a hazai jogszabályi környezetbe a „Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig”, [4] valamint a „Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája” [5] című dokumentumokban foglaltak szerint ültették át. A klímasemlegességi és korszerű energiaszerkezeti átállás egyik lehetősége a biogáz technológia innovációs lehetőségeinek kihasználásában, valamint az energia szezonális tárolását lehetővé tevő technológiákban rejlik, melyet a power-to-gas technológia innovatív módon integrál [6, 7, 8, 9]. A 2021 december végén megjelent, a földgáz-hálózatban szállítható biometán és hidrogén piacának közös szabályait megfogalmazó irányelv tervezet [10] a biometán és hidrogén részesedését a gáz halmazállapotú tüzelőanyag piaci mixben 66%-ra prognosztizálja, amely a biometanizáción alapuló P2G technológiák alkalmazását előtérbe helyezi. Illeszkedve a nemzetközi biometanizációs projektekhez [11], a hazai P2G technológiafejlesztés terén megvalósult tudományos és ipari kutatásfejlesztési eredmények [12, 13, 14] Magyarországon is megalapozzák a P2G technológiákban rejlő potenciál kiaknázását, és gyorsítják a hidrogéngazdaság irányába történő átmenetet [15]. Tovább növeli a P2G technológiák jelentőségét a fotovoltaiikus energiatermelés által generált hálózat-kiegyensúlyozási igény is [16].

Ahogy az energetika több területén is jelentős erőfeszítéseket tesznek a kutatók újabb és hatékonyabb technológiák kifejlesztésére [17], az említett célok érdekében is fontos további K+F projekteket is megvalósítani. Ezek olyan technológiák innovációkat célozhatnak, amelyek elősegítik a magyar energiaszektorok a változó trendekhez (például dekarbonizáció, körkörös gazdaság [18]) történő adaptációját [19]. A folyamatosan bővülő nemzetközi szakirodalom új kutatási témái között kiemelt szerepet kap az alगतartalmú alapanyag keverékek hasznosítása, biogáz és P2G technológiával előállított biometán termelés műszaki és gazdasági lehetőségeinek vizsgálata is [20] [21].

A biogáz, mint 50-75% metánt és 25-50% koncentrációban tartalmazó, 5,5-7,0 kWh/Nm⁻³ gázkeverék gázmotorokban történő energetikai hasznosítása több évtizedes múlttal rendelkezik [22] [23]. A hatékony biogáz termelés egyik alapvető feltétele a fermentációs alapanyag receptúra, amely a biogáztermelésben részt vevő mikroorganizmus közösségek számára optimális feltételeket biztosít. A megfelelő receptúra előállítás és a magasabb gázkon-

centráció és -hozam egyik lehetséges formája, ha a mezőgazdasági alapanyagokhoz kofermentációs terméként mikroalga eredetű biomasszát is adagolunk. [24] Az egysejtű, autotróf mikroalgák biodiverzitása kiemelkedő: becslések szerint körülbelül 200 000 – 800 000 faj létezik számos különböző nemzetségben, amelyek -faj és természetstechnológia függvényében – jelentősen eltérő módon képesek hatni a fajlagos biogázkihozatalra, valamint a gázkomponensek koncentrációjára [25].

A napfényt, vizet és a légköri szén-dioxidot felhasználó mikroalga organizmusokat leggyakrabban nyílt tavakban, zárt fotobioreaktorokban (PBR) valamint egyéb, hibrid rendszerekben állítják elő [26]. Fontos energetikában betöltött szerepüket alátámasztja az a kutatás [20], amely szerint az alga alapú biotüzelőanyag ipar a természetben előforduló algák hasznosításán fog alapulni, amelyet jelenleg a magas fajlagos energiaigényű és költségű algabetakarítás korlátoz.

A 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 azonosítójú, Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból meghirdetett tudomány és technológia pályázat keretében – a power-to-gas (P2G) technológia alkalmazásának lehetőségeivel foglalkozik az alga biomasszából előállított biogáz energetikai felhasználására fókuszálva. A magyar-indiai együttműködésben folytatott kutatás középpontjában a természetes vizekben található algabiomasszából származó biogáztermelés és ennek hasznosíthatósága áll. Az alga-betakarítással, az alga egyéb koszubsztrátokkal (ipari iszap, szarvasmarh trágya) keverése és annak anaerob fermentációjával kapcsolatos kísérleteket Indiában, az adatokon alapuló életciklus elemzését, környezeti-gazdasági értékelését a Debreceni Egyetem és a Pannon Egyetem kutatói végzik. A Power-to-Gas Hungary Kft. – mint a magyar konzorcium harmadik tagjának – az egyik feladata az indiai feltől kapott adatok alapján olyan méréseken alapuló vizsgálatot folytasson hajtson végre, amellyel a következő, az alkalmazott biometanizációs technológiára vonatkozó kérdésekre választ adnak:

- Lehetséges-e az alga biomasszából előállított biogáz magas konverziós hatásfokú átalakítása a rendelkezésre álló technológiával?
- A vizsgálandó keverékgáz alkalmazása okoz-e jelentős problémát az alkalmazott biokatalizátorban és a vizsgálati mérőberendezésen?
- Képes-e a technológia a keverékgáz nagy konverziós hatásfokú átalakítására?

Anyagok és módszerek

Kísérleti gázkeverék meghatározása

A rendelkezésre álló szakirodalom áttekintését követően az indiai fél megosztotta információit a végzett kísérletekről. A mezőgazdasági hulladékok alga biomasszával történő kofermentációja során keletkező biogáz, valamint az azzal egyenértékűnek tekintett kísérleti gázkeverék összetételét az 1. táblázat ismerteti.

1. táblázat. Alga biogáz és a kísérleti gázkeverék összetétele

Keverék komponens	Biogáz összetétel (% m/m)	Keverékgáz összetétel (% m/m)
Metán (CH ₄)	55-60	61
Szén-dioxid (CO ₂)	32-38	38,9
Oxigén (O ₂)	–	0,1

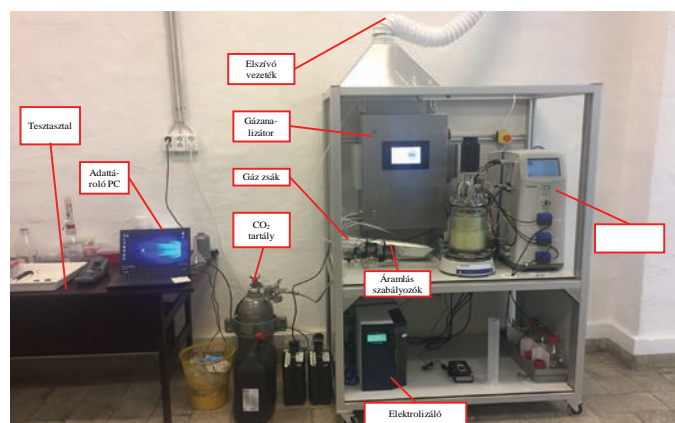
A rendelkezésre álló infrastruktúra alapján a vizsgálatok elvégzéséhez a nyomás alatti palackozott forma jöhetett csak számításba, mintavételi gázszák alkalmazása nem volt megvalósítható a szükséges térfogatáramok és nyomásviszonyok miatt. A metán és szén-dioxidon kívül kén-hidrogén és oxigén komponensek is előfordulhatnak a biogáz keverékekben [27], amelyekre vonatkozóan az indiai fél nem szolgáltatott információt. Savas környezetben a prototípus egyes részei (pl. tömitések) rongálódhatnak, amely a kén-hidrogén kísérleti keverékgázból történő eltávolítását indokolhatja. A kis mennyiségű oxigén összetevő azért került a gázkeverékbe, mert a hazai tapasztalatok azt mutatták, hogy a biogáz keverékek minimális koncentrációban tartalmazhatnak oxigént. A komponensek a keverékgázba történő foglalását az is igazolta, hogy az indiai kutatók a biogáz oxigén koncentrációjára vonatkozó méréseket nem végeztek.

A vizsgálandó – kísérleti – gázkeverék elkészítését az egyik jelentős gázkeveréket előállító és forgalmazó vállalat végezte. Az előzetes vizsgálatok során meghatározásra került, hogy a kísérleti gázkeveréket egyáltalán elő lehet-e állítani, a szállítandó gáztartály ürmérete, szállítási és tárolási formája, a balanszírozó gáz kijelölése, valamint a szállítási feltételei (a megrendelést követően 14 hét múlva érkezett a tartály a prototípus helyszínére). A szállított tartály főbb méretei:

- Palack űrtartalom: 10 liter
- Palack csatlakozó: M 19 x 1,5 LH; DIN 477 szerint Nr. 14
- Töltési nyomás: 115,93 barg

Laboratóriumi prototípus

A vizsgálatok lebonyolítását végző prototípust az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Vizsgálati P2G prototípus és részei

A prototípus főbb részei:

- hidrogénelőállítást végző polimer elektrolit membrán (PEM) elektrolízis,
- szén-dioxid/keverékgáz áramlásszabályozók,
- vízköpenyűtűtő, 2 l űrtartalmú kevert reaktor és azt üzemeltető vezérlőegység,
- ipari gázanalizátor.

Az áramlásszabályozókkal lehet beállítani a hidrogén:szén-dioxid/kísérleti gázkeverék térfogatáramait és koncentrációját. A vezérlőegység a biokatalizátor megfelelő működéséhez szükséges tápoldatok dózisait, a keverőtengely fordulatszámát és a reaktor hőmérsékletét szabályozza, míg a gázanalizátor – előre programo-

zott időközönként – a termékgáz metán-, hidrogén- és szén-dioxid koncentrációját méri.

A tápanyagpótlás mellett napi rendszerességgel történik a biokatalizátor egészségének vizsgálata. Erre a célra szolgálnak a laborhelyiségben lévő kézi műszerek, amelyekkel redoxpotenciált (ORP), valamint optikai sűrűséget (OD) lehet meghatározni. Az ORP a $(-200) - (-500)$ mV, az OD a $0,20 - 0,50$ tartományon belüli értéke igazolja a biokatalizátor üzemképességét (egészségét).

A prototípus felépítése a kereskedelmi üzemek felépítését és üzemét modellezi. A két lépcsőben megvalósított Sabatier-reakció:

- elektrolízis: (1)
- metanizáció: (2)

A (2) metanizációs egyenlet alapján a hidrogén: szén-dioxid sztöchiometriai aránya 4:1, amelynél a gyakorlatban magasabb értéket alkalmazunk és hidrogénben dúsabb keveréket juttatunk a reaktorba. [28]

A mérési eredményekből a szén-dioxid konverzió értékét a

$$\bullet \quad conv_{CO_2} = \frac{C_{CH_4}}{(C_{CH_4} + C_{CO_2})} \quad (3)$$

képlettel számítottuk, ahol a C_{CH_4} a metán-, a C_{CO_2} pedig a mért szén-dioxid koncentráció százalékos értékét jelöli. A szén-dioxid konverzió mellett a reaktor fajlagos napi gáztermelésének VVD (Volume of Gas/Volume of Liquid/Day) értékét is meghatároztuk. A VVD érték megmutatja, hogy 1 liter biokatalizátor mekkora térfogatú gázt állít elő egy nap alatt, és a

$$\bullet \quad VVD = conv_{CO_2} \cdot \varphi \cdot \dot{V}_{CO_2} \cdot \frac{60 \cdot 24}{2} \quad (4)$$

képlettel számítható. A képletben a \dot{V}_{CO_2} a szén-dioxid térfogatáramának l/min-ben megadott értékére vonatkozik. A nevezőben lévő 2-es érték a reaktorban lévő, átlagosan 2 liter biokatalizátor térfogatot jelöli. A φ a vizsgálandó gáz szén-dioxid tartalmát jelöli, tiszta szén-dioxid alkalmazásánál $\varphi=1$, a keverékgáz esetében $\varphi=0,389$ értéket kell az egyenletbe behelyettesíteni.

Előkészületek, kutatási terv

A vizsgálatot megelőzően a prototípus éves karbantartására került sor. A biokatalizátor lefejtését követően a reaktor csatlakozó csöveiben, a reaktortartályban található kisebb lerakódások megszüntetésre kerültek, majd az összeszerelést és a katalizátor visszatöltését követően a mérőműszerek, gázanalizátor és kontrollerben található szivattyúk kalibrációja is megtörtént. A gázkeverék összetételére HAZOP elemzést végezve a prototípus napi teendőit ellátó személyzet képzést és utasításrendet kapott az esetleges kockázatokról és probléma felmerülése esetén végrehajtandó teendőkről.

Az üzempróbát követően a prototípust néhány napig tiszta szén-dioxiddal üzemeltettük, valamint megfigyeltük a biokatalizátort, elkerülve az esetleges szivárgásokból adódó hibákat, vagy a biokatalizátor részleges, vagy visszafordíthatatlan károsodását. A kísérleti gázkeverék tartályt először 2021. december 8-án 14 órakor kötöttük be, a reduktor felszerelését követően a keverékgáz tartályt – a szén-dioxid tartály helyére rögzítettük.

A prototípus üzemére vonatkozóan a technológiához kapcsolódó és a prototípussal megvalósítható legfontosabb üzemeltetési scenáriókat, folyamatokat tartalmazó mérési terv készült, amely végrehajtásával lehetővé vált a keverékgáz szén-dioxid konverzió technológiai potenciáljának felmérése. Ezek a scenáriók a következők:

- melegindítás
- normál üzem,
- szén-dioxid: hidrogén térfogatáram változtatása,
- keverő fordulatszámának változtatása,
- hőmérséklet változtatása.

Az előzetes kutatási tervet a 2. táblázat szemlélteti:

A táblázat sárgával jelöli a referencia méréseket, zöld háttérrel pedig a kísérleti keverékgázra vonatkozó mérési scenáriókat. Az előzetes terv tartalmazza azokat a feltételezett időpontokat, teendőket, amelyek a mérés során pontosításra kerültek. A terv elkészítése során figyelembe vettük a palackozott gázmennyiséget, valamint a korábbi tapasztalatok alapján állapítottuk meg a szükséges mérési időtartamokat. Az egymást követő scenáriókat megelőzően a gázzsák tartalmát ürítettük, az adatokat rögzítettük.

A vizsgálatok részletes leírása

A vizsgálatok indítása: a korábban, regenerációs tevékenységre használt 4.5 minőségű szén-dioxidot tartalmazó tartály leköltése, a gázreduktor keverékgázra történő rákötését, valamint a gázzsák tartalmának kiürítését követően a vizsgálat 2021. december 8-án, 14 órakor kezdtük meg. Korábbi referenciaként alkalmazható vizsgálatokhoz 4,5:1 hidrogén : szén-dioxid arány került beállításra korábban (szén-dioxid térfogatáram: 40 ml/min, hidrogén térfogatáram: 180 ml/min). Az elméleti 1:4 aránynál hidrogénben dúsabb beállítást a hidrogén vízben történő rosszabb oldódása magyarázza. Mivel ez a beállítás tiszta szén-dioxid esetén alkalmazható, ezért a keverékgáz esetére ezt át kellett konvertálni, mivel az

- 61%-ban metánt
- 38,9%-ban szén-dioxidot.

tartalmazott. A vizsgálatok indítása során a tápanyagszivattyúkat ennek megfelelően átállítottuk.

Melegindítás: a melegindítás azt a helyzetet szimulálja, amikor a megfelelő mennyiségű alapanyag ideiglenesen nem áll rendelkezésre, de a hiány bármikor megszűnhet (pl. nincs az energiahálózatban megfelelő mennyiségű megújuló villamos energia, amely az elektrolízishez szükséges), valamint a melegindítás során arra is kíváncsiak voltunk, hogy a keverés elhagyásával megvalósul-e a metánkonverzió, illetve ha igen, akkor a keverés milyen mértékben járul hozzá a szén-dioxid átalakításhoz. A melegindítást keverés nélkül és – később – 700 min^{-1} fordulatszámot alkalmazva is elvégeztük. A melegindítást megelőzően a reaktor hőmérsékletét 62 °C-os hőmérsékleten tartottuk, az ammónium-hidroxid és a nátrium-szulfid szivattyúkat leállítottuk.

normál üzem: Adott keverékösszetétellel, és a beállításokhoz tartozó tápszivattyú beállításokkal, valamint 700 min^{-1} keverőtengely fordulatszámmal történő üzemet vizsgáltuk.

fordulatszám változtatása: a fordulatszám növelésével javul a gáz-folyadék átmenet, így a magasabb szén-dioxid konverziós érték valószínűsíthető. A keverő fordulatszámát 700 min^{-1} értékről 800 min^{-1} értékre, majd 900 min^{-1} értékre növeltük. A gázáram és a hőmérséklet értékein nem változtattunk.

szén-dioxid : hidrogén keverékarány változtatása: mind a saját, mind a kereskedelmi üzemi gyakorlat igazolja, hogy az elméleti 1:4 szén-dioxid : hidrogén inputgáz keverékarányhoz képest hidrogénben dúsabb, minimum 1:4,2 keverékarányt érdemes alkalmazni. A termékgázban a maradék szén-dioxid egyik gyakori oka a hidrogén hiánya, amely a hidrogén vízben való rosszabb oldódásának a következménye, és az inputgázok hidrogénkomponens térfogat-

2. táblázat. Előzetes kutatási terv a kísérleti keverékgáz minősítéséhez

No	Dátum	Nap	Leírás	Összetétel	Keverő ford. [min ⁻¹]	Hőmérséklet [°C]
1	2021.december 7.	kedd	tiszta szén-dioxid beadagolás (referencia)	CO ₂ : 0,040 ml/min, H ₂ : 0,188 ml/min (1:4,8 CO ₂ : H ₂)	700	62
2			CO ₂ : H ₂ arány arány csökkentés	CO ₂ : 0,040 l/min, H ₂ : 0,170 ml/min (1:4,25 CO ₂ : H ₂)		
3			keverő fordulatszám növelése		900	
4			STOP		700	
5	2021.december 8.	szerda	hidegindítás	CO ₂ : 0,040 l/min, H ₂ : 0,170 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂)	700	62
6		szerda	STOP és tartálycseré			
7	2021.december 8.	szerda	melegindítás	a keverék 38,9 % CO ₂ , 61% CH ₄ , 0,1% O ₂ komponensgáz összetétel, CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)	0	62
8			keverő indítás	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)	700	
4			fordulatszám növelés	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)	800	
5			fordulatszám növelés	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)	900	
6			fordulatszám csökkentés, CO ₂ : H ₂ arány növelés	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,131 ml/min egyenérték (1:4,5 CO ₂ : H ₂ arány)	700	
7			fordulatszám növelés emelt CO ₂ : H ₂ arány mellett	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,131 ml/min egyenérték (1:4,5 CO ₂ : H ₂ arány)	900	
8			2021. december 16.	csütörtök	hőmérséklet növelés	
9	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)	700				68
10	hőmérséklet csökkentés	CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)			700	60
11		CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)			700	58
12		CO ₂ : 0,075 l/min, H ₂ : 0,124 ml/min egyenérték (1:4,25 CO ₂ : H ₂ arány)			700	54

áramának növeléssel, vagyis hidrogéndúsítással lehet orvosolni. Az inputgázok kezdeti (1:4,25) keverékarányról egy hidrogénben dúsabb 1:4,5 arányra módosítottuk a beállításokat.

Hőmérséklet változtatása: a vizsgálat során a hőmérsékletnövelés és csökkentés biokatalizátorra gyakorolt hatását vizsgáljuk. A hőmérséklet csökkentésével bár javul a gáz-folyadék fázisátmenet, de a biokatalizátor aktivitása alacsony hőmérsékleten kisebb, a mikrobák metabolizmusa a romlik. Először a hőmérsékletnövelés okozta változásokat elemeztük: a hőmérsékletet először 64 °C, majd 68 °C-ra emeltük, a biokatalizátor hőmérséklete 10 percen belül stabilizálódott. Ezt követően a hőmérsékletcsökkentés hatását vizsgáltuk – reaktor hőmérsékletét először 60 °C-ra, majd 58 °C és 54 °C-ra csökkentettük. A hőmérsékletcsökkentés hatásának vizsgálata során kellő időt hagyunk a biokatalizátor lehűléséhez és a méréseket csak ezt követően kezdtük meg.

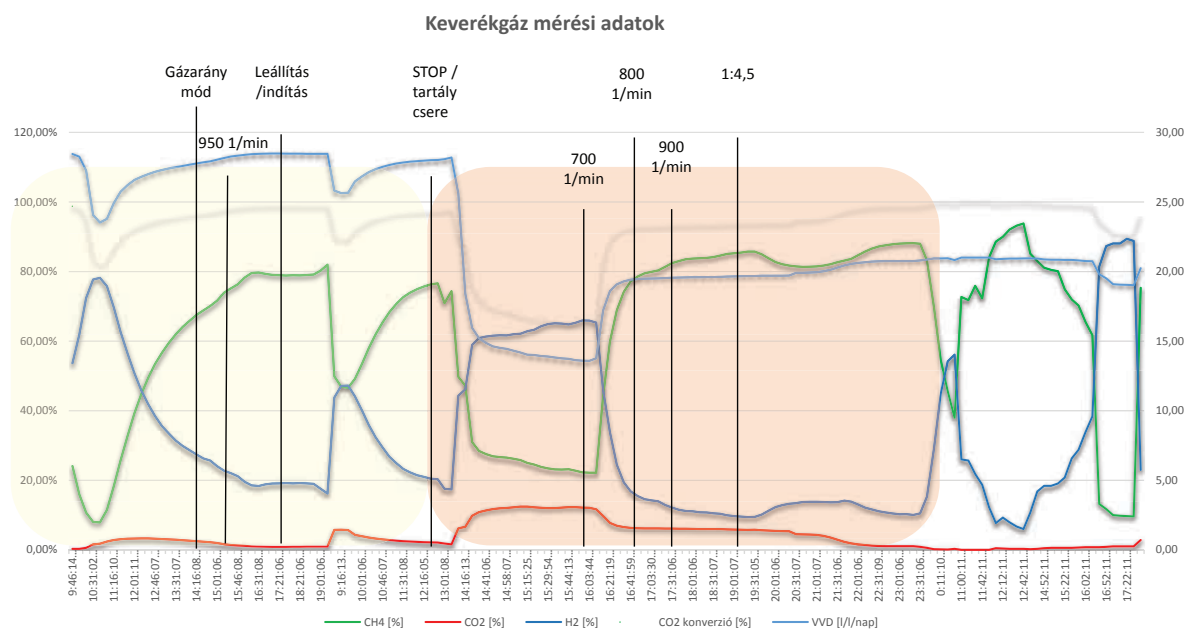
Eredmények

A mérési eredmények grafikus bemutatását a 2. ábra szemlélteti.

Az ábrán pontozott függőleges vonal mutatja az egyes szenáriók határait. Sárga háttérrel a referenciamérés, pirossal a kísérleti gázkeverékre vonatkozó vizsgálatok eredményeit jelöltük. A mérés során egyes csővezeték szakaszokban dugulást tapasztaltunk, ezért a mérési sorozatot meg kellett szakítani és – az eszközök tisztítását követően – tiszta szén-dioxid alkalmazásával regenerációt kellett végrehajtani, amely magyarázza az ábra jobb oldalán lévő sárga terület megjelenítését.

A referenciagáz mérési eredményeit a 3. táblázat foglalja össze.

A referenciaidőszakban maximális konverzió 98,9%, a VVD maximuma 28,48 l/nap. A 4,25:1 H₂:CO₂ arány 0,21 l·min⁻¹ teljes gázáram mellett valósult meg. A CH₄, CO₂ és H₂ koncentrációk összege azért különbözhet a 100% értéktől, mert az alkalmazott



2. ábra. A mérési sorozat grafikus megjelenítése

3. táblázat. Referenciamérési sorozat átlagok és szórások

referencia mérés (rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,25 :1)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ (%)	conv _{CO2} (%)	VVD (l/l/nap)
(H ₂ : 0,17 l/min, CO ₂ =0,04 l/min)	74,4 (s*= 1,8)	2,2 (s*= 0,3)	20,5 (s*= 2,0)	97,2 (s*=0,4)	27,99 (s*= 0,10)

4. táblázat. Kísérleti keverékgáz melegindítási üzemmód – vizsgálati átlagok és szórások

Melegindítás (rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,5 :1)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ (%)	conv _{CO2} (%)	VVD (l/l/nap)
(rpm= 0 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,25 :1)	25,0 (s*=2,4)	11,0 (s*=0,6)	63,3 (s*= 2,0)	67,6 (s*= 2,9)	14,20(s*= 0,60)
(rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,5 :1)	73,2 (s*= 1,6)	0,0 (s*= 0,0)	23,1 (s*= 3,0)	100 (s*= 0,0)	21,01(s*= 0,00)

5. táblázat. Keverőtengely fordulatszámának a hatása a kísérleti keverékgáz biometanizációjára – vizsgálati átlagok és szórások

Keverő fordulatszám változtatása (t=62°C)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ (%)	conv _{CO2} (%)	VVD (l/l/nap)
(rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,25 :1) - normál üzem	72,4 (s*=11,3)	6,8 (s*= 1,1)	21,1 (s*=10,2)	61,0 (s*= 3,3)	19,12 (s*= 0,69)
(rpm= 800 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,25 :1)	83,4 (s*= 0,5)	6,0 (s*=0,0)	11,26 (s*= 0,5)	93,2 (s*= 0,1)	19,58 (s*= 0,52)
(rpm= 900 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,25 :1)	85,7 (s*= 0,6)	5,9 (s*= 0,1)	10,2 (s*= 0,4)	93,5 (s*= 0,1)	19,64 (s*= 0,03)
(rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,5 :1)	82,8 (s*=1,5)	4,6 (s*= 1,0)	12,6 (s*=1,6)	94,7 (s*= 1,1)	19,89 (s*= 0,23)
(rpm= 900 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,5 :1)	86,9 (s*= 1,5)	1,2 (s*=0,3)	11,3 (s*=1,2)	98,7 (s*=0,4)	20,72 (s*= 0,08)

6. táblázat. Hőmérséklet hatása a kísérleti keverékgázból előállított termékgáz jellemzőire – vizsgálati átlagok és szórások

Hőmérséklet változtatása (rpm= 700 min ⁻¹ ; H ₂ :CO ₂ = 4,5 :1)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ (%)	conv _{CO2} (%)	VVD (l/l/nap)
hőmérséklet (t=64°C)	81,6 (s*= 6,4)	0,2 (s*= 0,2)	12,9 (s*= 5,5)	99,8 (s*=0,2)	20,97 (s*= 0,06)
hőmérséklet (t=68°C)	90,8 (s*= 3,1)	0,3 (s*= 0,1)	8,1 (s*= 1,7)	99,7 (s*= 0,1)	20,94 (s*= 0,01)
hőmérséklet (t=60°C)	79,9 (s*= 2,7)	0,5 (s*= 0,1)	18,7 (s*= 1,3)	99,3 (s*= 0,2)	20,69 (s*= 0,03)
hőmérséklet (t=58°C)	56,5 (s*= 22,0)	0,7 (s*= 0,1)	41,7 (s*= 20,2)	98,0 (s*= 1,9)	20,59 (s*= 0,39)
hőmérséklet (t=54°C)	21,0 (s*= 24,3)	1,3 (s*= 0,7)	77,5 (s*= 24,4)	92,0 (s*= 2,1)	19,33 (s*= 0,44)

gázanalizátor detektorai csak e három gázkomponens (CH₄, CO₂ és H₂) mérését képes biztosítani.

A kísérleti keverékgáz melegindítási üzemmódjának vizsgálatakor a keverés nélküli és nominális fordulatszám mellett (700 min⁻¹) mértük a termékgáz koncentrációit. Az eredményeket a 4. táblázat tartalmazza.

A keverés nélküli üzemmód – a várakozásoknak megfelelően – alacsony metánkoncentrációt, magas szén-dioxid és hidrogénkoncentrációt eredményezett. A szén-dioxid konverzió alacsony,

67,6%-os értéke azt mutatja, hogy jelentős szén-dioxid maradt a termékgázban. A későbbi időpontban – hidrogénben dúsabb keverékgázzal és nominális, 700 min⁻¹ keverő fordulatszámmal – megismételt kísérlet a referenciamérési eredményekhez közel azonos értékeket eredményezett.

A keverés fordulatszámának vizsgálatokor 4:25:1 hidrogén:kísérleti keverékgázbeli szén-dioxid arány mellett 700 min⁻¹, 800 min⁻¹ és 900 min⁻¹, valamint 4:5:1 keverékarány esetében 700 min⁻¹ és 900 min⁻¹ fordulatszámokat alkalmaztunk. A termékgáz komponensek koncentrációinak mérési sorozataira vonatkozó, valamint azokból számított szén-dioxid konverzió és VVD átlagértékeket és korrigált tapasztalati szórásokat az 5. táblázat mutatja be.

A hidrogén: szén-dioxid arány 4:25:1 értékről 4,5:1 arányra történő növelésével, 700 min⁻¹ fordulatszám mellett a szén-dioxid koncentráció 6,8%-os értékről, 4,6%-ra csökkent. A hidrogénben szegényebb 4,25:1 beállításra számított alacsony konverziós átlagérték a keverés nélküli üzemmódot követő biokatalizátor regenerálódás következménye, amelyet a 2. ábra CH₄ koncentráció görbe meredek emelkedése is alátámaszt. A fordulatszám növelése kedvezően hat a gázoknak a folyékony biokatalizátorba történő átmenetére.

Azonos fordulatszámokat vizsgálva a hidrogénben dúsabb keverék magasabb conv_{CO2} értéket eredményezett, amely igazolja, hogy a 4,25:1 arány alkalmazása esetén a hidrogén a gáztermelést limitáló tényező.

A hőmérséklet változtatásának a termékgáz jellemzőire vonatkozó hatásának vizsgálati méréseit az 6. táblázat szemlélteti.

A hőmérséklet hatására a mikroorganizmusok metabolizmusának aktivitása növekszik. A termékgáz metánkoncentrációja növekszik. A szén-dioxid koncentráció és az abból számított conv_{CO2} és VVD átlagértékek minimálisan csökkentek. A hőmérsékletcsök-

centés hatására – a rosszabb oldódás miatt – először a hidrogén koncentráció növekedett meg, amelyet – időben eltolva – a szén-dioxid koncentráció is követett. Az 54 °C hőmérsékleten a metán-koncentráció átlagértéke 21% volt, amelyből csekély biokatalizátor aktivitásra lehet következtetni. Elképzelhető, hogy hosszabb ideig vizsgálva a mért értékek és számított paraméterek jelentősebb mértékű romlását tapasztalhattuk volna.

Konklúzió

A vizsgálat során bebizonyosodott, hogy az alkalmazott biokatalizátor alkalmas az alga biomassából előállított biogáz szén-dioxid tartalmának magas fokú biometanizációjára. A tiszta szén-dioxidot alkalmazó 4,25:1 hidrogén:szén-dioxid arányú gáz-elegy biometanizációs termékigazra vonatkozó referenciamérések eredményeit csak dúsabb, 4,5:1 hidrogén:kísérleti gázkeverék szén-dioxid tartalom arányú inputgáz-keverék alkalmazásával lehetett megközelíteni. A hidrogénben dúsabb elegy alkalmazásának egyik oka a kísérleti gázkeverék 0,1% oxigéntartalma okozhatta. A vizsgálatok a biokatalizátor működésében jelentős problémát nem okoztak, ugyanakkor a mérés sorozat közben tapasztalt dugulás okait érdemes a továbbiakban vizsgálni.

A keverés és a hőmérsékletemelés kedvezően hatott a mért és számított paraméterekre. A termékigaz metánkoncentrációjának maximuma 93,8%, $conv_{CO_2}$ számított érték pedig 100% volt – mindkét értéket 4,5:1 hidrogén:szén-dioxid keverékarány és emelt (64 °C és 68 °C) hőmérséklet alkalmazása mellett mértük.

A keletkezett metabolikus víz (szubsztrátum) összetétele meghatározza az elhelyezési és hasznosítási technológiát. A jövőben a biometanizációs szubsztrátum biogáz reaktorba történő visszavezetésének és alga biomasszával történő kofermentációját érdemes megvizsgálni.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton mond köszönetet a Kutatás-fejlesztési és Innovációs Állami Tőkealapkezelő Zrt. / Hiventures Zrt., valamint a Vértesi Erőmű Zrt. számára a K+F+I tevékenységek megvalósításának támogatásáért.

Készült a 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 azonosítójú, „Alga biomassából előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások” című projekt keretében.

Irodalom

- [1] Európai Bizottság, „The European Green Deal - Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions,” 11.12.2019, Brussels, 2019.
- [2] EC, „Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC,” OJ L 140, 5.6., p. 16–62, 2009.
- [3] EC, „Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (Text with EEA relevance.),” pp. 82-209, 2018.
- [4] ITM, Nemzeti Energiestratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig, Január, 2020.
- [5] ITM, „Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája - Stratégia a tiszta hidrogén és hidrogéntechnológiák hazai bevezetésére és a hidrogén-ipar háttérbázisának megteremtésére,” május, 2021.
- [6] Z. Csedő, „Power-to-Gas: egy ígéretes lehetőség a megújuló energiaforrások integrációjára,” Zöld Ipar Magazin, 7 (10), pp. 28-29, 2017.
- [7] Z. Csedő és M. Zavarkó, „The role of inter-organizational innovation networks as change drivers in commercialization of disruptive

- technologies: the case of power-to-gas,” International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 28, pp. 53-70. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3388>, 2020.
- [8] K. Kummer és A. R. Imre, „Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology,” Energies, 14, p. 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>, 2021.
 - [9] G. Pintér, „The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries—A Case Study,” Energies, 13 (23), p. 6408. <https://doi.org/10.3390/en13236408>, 2020.
 - [10] EC, „Proposal for a directive of the European Parliament and Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen,” 15 12 2021. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0803&from=EN>.
 - [11] M. Zavarkó, A. Imre, G. Pörzse és Z. Csedő, „Past, Present and Near Future: An Overview of Closed, Running and Planned Biomethanation Facilities in Europe,” Energies, 14, p. 5591. <https://doi.org/10.3390/en14185591>, 2021.
 - [12] Z. Csedő, „A power-to-gas technológiafejlesztés üzleti modellje Magyarországon,” Energiagazdálkodás, 60 (különszám), pp. 17-20, 2019.
 - [13] Z. Csedő, „A power-to-gas technológiafejlesztés tapasztalatai Magyarországon,” Energiagazdálkodás, 61 (5-6), p. 16, 2020.
 - [14] Z. Csedő, „A power-to-gas technológia implementációs lehetőségei a hazai szennyvíztisztító telepeken,” Energiagazdálkodás, 62 (különszám), pp. 3-8, 2021.
 - [15] Z. Csedő, M. Zavarkó, B. Vaszkun és S. Koczkás, „Hydrogen Economy Development Opportunities by Inter-Organizational Digital Knowledge Networks,” Sustainability, 13, p. 9194. <https://doi.org/10.3390/su13169194>, 2021.
 - [16] H. Zsiborács, G. Pintér, A. Vincze, Z. Birkner és N. Hegedűsné Baranyai, „Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting,” Energy Reports, 7, pp. 3805-3818. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.007>, 2021.
 - [17] S. Daniarta, K. Kolasiński és A. R. Imre, „Thermodynamic efficiency of trilateral flash cycle, organic Rankine cycle and partially evaporated organic Rankine cycle,” Energy Conversion and Management, 249, p. 114731. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114731>, 2021.
 - [18] M. Zavarkó és Z. Csedő, „Körkörös gazdaságfejlesztési és dekarbonizációs lehetőségek a power-to-gas technológia magyar szennyvíztisztító telepeken való alkalmazásával,” Hidrológiai Közöny, 101 (3), p. 60, 2021.
 - [19] Z. Csedő, M. Zavarkó és Z. Sára, „A vállalati innováció által indukált szervezeti változások a magyar energiaszektorban,” Vezetéstudomány / Budapest Management Review, 49 (2), pp. 53-62. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2018.02.06>, 2018.
 - [20] D. M. Wall, S. McDonagh és J. D. Murphy, „Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy,” Bioresource technology, 243, pp. 1207-1215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.115>, 2017.
 - [21] G. Pörzse, Z. Csedő és M. Zavarkó, „Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology,” Energies, 14 (8), p. 2297. <https://doi.org/10.3390/en14082297>, 2021.
 - [22] C. M. Plugge, „Biogas,” Microb Biotechnology, 10(5), p. 1128– 1130, 2017.
 - [23] S. Siddiqui, B. Zerhusen, M. Zehetmeier és M. Effenberge, „Distribution of specific greenhouse gas emissions from combined heat-and-power production in agricultural biogas plants,” Biomass Bioenergy 2020, , pp. 133, 105443, 2020.
 - [24] M. Debowski, M. Kisiulewska, J. Kazimierowicz, A. Rudnicka, Z. Romanowska-Duda, M. Dudek és M. Zielinski, „The effects of Microalgae Biomass Co-Substrate on Biogas Production from the Common Agricultural Biogas Plants Feedstock,” Energies, 13, 2186, 2020, .
 - [25] B. Rincón, M. J. Fernández-Rodríguez, D. d. I. Lama-Calvente és R. Borja, „The Influence of Microalgae Addition as Co-Substrate in Anaerobic Digestion Processes,” 2018. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/60275>.
 - [26] G. Leonzio, „Power to Gas Systems Integrated with Anaerobic Digesters and Gasification Systems,” Waste Biomass Valor 12, pp. 29-64. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00914-4>, 2021.
 - [27] J. Dr. Hajdú, „Biogázüzemek működése és biogáz üzemi technológiák,” OBEKK Tudományos Szakmai Kiadványok, 2009.
 - [28] M. R. Martin, J. J. Fornero, R. Stark, L. Mets és v. L. T. Angenent, „A Single-Culture Bioprocess of Methanothermobacter thermoautotrophicus to Upgrade Digester Biogas by CO₂-to-CH₄ Conversion with H₂,” Archaea, 2013.

Biogázcélú algatermesztés és -felhasználás perspektívái hazánkban és Indiában

Bai Attila

egyetemi tanár, bai.attila@econ.unideb.hu

Sertoli Ardit

PhD-hallgató, sertoli.ardit@econ.unideb.hu

Gabnai Zoltán

tudományos munkatárs, gabnai.zoltan@econ.unideb.hu

Balogh Péter

egyetemi tanár, balogh.peter@econ.unideb.hu

Az algák rendkívül magas hozammal és sokféle felhasználási lehetőséggel rendelkező növényi szervezetek. Előállításuk során választani kell az olcsóbb, ám kevésbé termelékeny és bizonytalan minőséget előállító nyílt vízi technológiák, valamint a rendkívül magas hozamokkal, egyöntetű és tervezhető minőséget garantáló, ám rendkívül tökeigényes automatizált zárt technológiai rendszerek között. Indiában a klimatikus adottságok lehetővé teszik a nyílt vízi technológiák folyamatos működtetését is, tapasztalataik ugyanakkor hasznosak lehetnek a hazai, különböző eredetű szennyvizeket ártalmatlanító biogáztelepek, illetve a jelentős CO₂-kibocsátással rendelkező erőműveink, bioetanol-üzemeink technológiai fejlesztéséhez is. Cikkünkben egy indiai-magyar közös kutatómunka létjogosultságát és kezdeti megállapításait mutatjuk be.

*

Algae are plant organisms with very high yields and a wide range of utilization possibilities. Before their production, we need to choose between the cheaper but less productive open pond technologies with uncertain quality and the capital intensive, automated, closed technology systems with outstanding yields and predictable quality. In India, the climatic conditions allow for the continuous operation of open pond technologies. Still, their experience can also be useful for the technological development of the Hungarian biogas plants using wastewater from various sources, and for the power plants and bioethanol plants with significant CO₂ emissions. This article presents the justification and initial findings of a joint Indian-Hungarian research project.

Az algafajok magas fotoszintetikus aktivitása (6-8%) és gyors szaporodása kiemelkedően magas hozamokat eredményez bármely más mezőgazdasági kultúrnövényhez képest, amennyiben rendelkezésre állnak a fotoszintézishez és a növekedéshez szükséges alapfeltételek (fény, hőmérséklet, makro- és mikro-tápanyagok, valamint szén-dioxid) [1]. Mindehhez nem igényelnek termőtalajt, vagyis nem veszélyeztetik a globális élelmiszer-termelést. Ugyanakkor az optimális körülmények biztosítása és a tiszta algakultúra előállítása mesterséges körülményeket igényel, magas beruházási- és működtetési költségekkel.

A felhasználást tekintve a legtöbb európai alga-előállító vállalat (51%) élelmiszereket, étrend-kiegészítőket, valamint takarmány-kiegészítőket (10%) állít elő az algából, a kozmetikai termékek mintegy 17%-os részarányt képviselnek, míg az összes többi felhasználás (beleértve az energiatermelést is) csak kis részesedéssel bír [2].

A mikroalgák rendkívül sokféle, olykor extrém körülmények között is előfordulnak, de növekedési ütemük, termőképességük

természetes körülmények között meglehetősen korlátozott az optimális növekedési feltételek hiánya miatt, az algakonzorcium összetétele pedig a nyitott körülmények miatt kiszámíthatatlan. A gazdaságosságot viszont az olcsó tápanyag-ellátás alapvetően befolyásolja, ezért a nagy tápelem-tartalmú természetes vizek, valamint a megfelelő összetételű szennyvíz is kedvező módon hasznosíthatók [3,4].

Mivel a levegőben jellemzően igen alacsony a széndioxid koncentrációja (0,039 térf% = 390 ml/l) és ebből is csupán 0,7 ml (1,4 g)/l diffundál a vízbe egyensúlyi állapotban, ezért sok esetben a széndioxid hiánya jelentkezik terméskorlátozó tényezőként, így ennek pótlására akár a biogázüzemek által kibocsátott füstgáz, vagy a tisztításkor melléktermékként keletkező széndioxid is alkalmas lehet [5].

A hazai algatermelés lehetőségei

Hazánkban a kontinentális éghajlat miatt természetes körülmények között a folyamatos algatermelés nem oldható meg, az algakultúrák egyöntetűsége és a termésmennyiség növelése csak drágább, zárt rendszerekben biztosítható. Itt a természetes fény mellett mesterségesen szabályozható világítással, steril körülmények és optimális hőmérséklet mellett szaporíthatók az algák. Az intenzív szaporulat következtében a reaktorméreték egyéb biotechnológiai eljárásokhoz viszonyítva kicsinek mondhatók. A beruházási és működtetési költségek csökkentése érdekében történtek kísérletek a hazai körülmények között is olcsóbban működtethető és viszonylag szerény beruházással, állattartó telepeken létrehozható, szennyvizet feldolgozó algatermesztési (félintenzív, tavas rendszerű) technológia kidolgozására (Monergo Kft.) is. A zárt rendszerekben is léteznek magyar kutatások teljesen komplett, más energetikai eljárásokhoz kapcsolható nagyüzemi technológiák kifejlesztésére (Első Magyar Algatechnika Kft.), valamint a termelékenység fokozása érdekében a sokkal intenzívebb algatermesztést lehetővé tevő piramidális fotobioreaktorok vonatkozásában (Envihorizont Kft.) is [6]. A félintenzív technológia elvileg a rizstermesztésre, vagy halgazdálkodásra gazdasági szempontból már kevésbé alkalmas tófelületek hasznosítására is alkalmas lenne.

Az indiai algatermelés

India gazdasága és népessége egyaránt gyors ütemben növekszik, ez pedig maga után vonja a hulladékok és az energiahordozók iránt nagymértékben növekvő keresletet is. Ez az ország energiabiztonsága számára komoly kihívást jelent, mivel kőolajának nagy részét a világ instabil régióiból importálja. Az alga termelése elősegítheti a közegészségügyi viszonyok javulását, a feldolgozása által nyerhető végtermékek pedig jelentős mértékben hozzájárulhatnak a kőolaj alapú energiaforrások helyettesítéséhez, valamint az élelmiszer-elátáshoz is.

Milbrandt – Jarvis (2010) tanulmánya alapján Indiában nagyon kedvezőek a feltételek az algatermesztésre: a sok napsütés, a jellemzően meleg éghajlat, az ipari CO₂ és egyéb tápanyagforrások, továbbá jelentős nagyságú kedvezőtlen adottságú, marginális területek és szennyezett víz az algatermesztéssel jól összeköthetők. A szükséges vízfelületek is rendelkezésre állnak: az alga extenzív módon eredményesen termeszthető a rizsföldeken, magas sótartalmú körülmények között, települési szennyvíz-tárolókon, valamint olyan tengerparti területeken, ahol nincs halászat [7].

A technológia tehát képes hasznosítani a rossz minőségű ipari, mezőgazdasági és lakosság szennyvizet is, melyek az országban hatalmas potenciális lehetőségekkel bírnak. A fenntartható algatermeléssel hasznosítható marginális minőségű szántóföldek és legelők, a degradált erdők, az ipari/bányászati puszták és a homokos/sziklás/csupasz területek kiterjedése az országban körülbelül 55,27 Mha, vagyis a teljes földterület körülbelül 18%-a [8].

Indiában Milbrandt – Jarvis (2010) kétféle megközelítést javasol az algatermesztés telephelyének kialakítására. Az első a szennyvízkezeléssel együtt működik, ahol a technológiai folyamat melléktermékeként képződnek természetes módon (bár kiszámíthatatlan minőségben és összetételben) algák. A szennyvíz termőközegként történő felhasználása költséghatékony megoldást jelenthet, mivel a hagyományos szennyvíztisztítás költsége ennél jóval magasabb lehet. Az algafarmok telepítésére javasolt helyek ez esetben a kommunális és ipari szennyvíztisztító létesítmények közelében jelölhetők ki. Ez a lehetőség India legtöbb államában adva van.

A második az ipari létesítmények, mint széndioxid-források mellé telepített algatermelő egységek létesítése, melyek célja a CO₂ megkötése, mielőtt az a légkörbe kerülne. Ennek során eredetileg hasznosítatlan CO₂ felhasználására nyílik lehetőség, emellett elkerülhetők a szállítási/kezelési költségek. A vizsgálatok alapján az algatermesztés céljából az adott telephelyen a CO₂-kibocsájtó létesítmények megléte mellett szükséges az egyéb inputok megléte, valamint a technológia műszaki, gazdasági, környezeti és társadalmi követelményeinek való megfelelés is. Ilyen algafarmok számára megfelelő helyszínek elsősorban az ország nyugati és déli részeinek ipari területein, valamint a part menti területeken találhatóak [7].

A természetes vizek alga-ökoszisztémája

Általánosságban minden algafajra, illetve technológiára igaz, hogy fokozottabb olajtermelés mellett lassabb növekedés figyelhető meg, az intenzívebb növekedés pedig alacsonyabb olajtartalommal jár. Az édesvízi algák átlagos biomassa-termelése a 0,2 g/l/nap érték körül mozog, az ehhez társuló átlagos olajtartalom pedig 18-20%. A tengeri fajok esetében sokkal nagyobb szórás tapasztalható, a kovaalgák magas olajtartalmúak, míg a szintén tengerben élő vörös algák olajtartalma jellemzően mindössze ennek harmada.

Moheimani-McHenry (2013) [9] tanulmánya szerint a hőmérséklet az egyes hónapokban (a napsugárzás eltérő spektruma és mértéke miatt) a nyílt vízi rendszerekben eltérően befolyásolja az algahozamot. Kísérleteik szerint a hozamváltozás a következő volt:

- február: 13-30 °C közötti hőingás, 2,6-szoros hozamnövekedés
- szeptember: 10-27 °C közötti hőingás, 2,5-szeres hozamnövekedés
- november: 10-32 °C közötti hőingás, 3-szoros hozamnövekedés

Teljes megvilágításban (ceteris paribus) ugyanezek a szerzők a hőmérséklet kisebb mértékű, de jelentős hozamváltoztató hatásáról

számoltak be, a 10 °C-os hőmérséklethez képest 25 °C-on mintegy 15%, 32 °C-on mintegy 40%-kal magasabb hozamot mértek a *Phleurocysis carterae* algafaj esetében.

Általában jellemző, hogy a megfelelő tisztítóberendezések hiánya miatt a fejlődő országokban nem megfelelően tisztított szennyvíz kerül a környezetbe, ami a természetes vizek szennyeződéséhez és eutrofizációjához vezet. A fizikai, kémiai és biológiai lakossági szennyvíztisztítást követően visszamaradó tápanyagok algás hasznosítását Kumar et al. (2019) [10] vizsgálta az indiai Újdelhiben található Hauz Khas-tó példáján keresztül. A Hauz Khas-tóba ömlik az Újdelhiben található egyik szennyvíztisztító üzem tisztított szennyvize, ezáltal egész évben megfigyelhető benne az algavirágzás 2001 óta. Az indiai kormány hatalmas összegeket fektetett be a Hauz Khas és más hasonló újdelhi tavak megtisztítására és újjáélesztésére [11,12]. A tó életképességének és vízi flórájának megőrzése érdekében a szokásos gyakorlat a kézi algatisztítás (szövetek és szűrők használatával), majd a leválasztott alga-biomassa ártalmatlanítása. A kutatómunka koncepciója szerint azonban a Hauz Khas-tó alga-biomasszája a metántermelés potenciális nyersanyagaként szolgálhatna [13,14].

A Hauz Khas-tóból gyűjtött alga-biomassa különböző algafajok keveréke, amelyekben a *Chlorella*, a *Merismopedia*, a *Closteriopsis* és a *Scenedesmus* fajok domináltak [15]. Az alga biomassa szénben (50% TS) gazdag volt, jelentős mennyiségű hidrogént (8,5% TS) és nitrogént (4,98% TS) tartalmazott. A becsült C/N arány 10,08/1 volt, amely jóval kevesebb az optimumnál (15-25/1) és aláhúzza azt, hogy az algák jellemzően csak a receptúra részeként használhatók fel erjesztésre. A szerzők az elméleti metánhozamot a beltartalom alapján körülbelül 773 ml g⁻¹ VS-re becsülték, a Buswell-egyenletet alkalmazva, mely azonban a gyakorlatban valószínűleg jelentősen alacsonyabb.

Kumar et al. (2019) szerint bár az algatermesztéshez kapcsolódó anyagköltségeket jelentős mértékben csökkenti a szennyvízzel dúsított természetes vízi termesztés, az eredményes működtetés jelentős korlátja a szezonálisan változó alapanyag-ellátás [10]. Mivel a Hauz Khas-tónál az algavirágzás egész évben jelen van, így megvalósíthatónak tűnik a folyamatos biogáz-előállítás is, amennyiben a tóba bevezetett szennyvíz mennyiségét és minőségét optimalizálják.

Szennyvíztelepeken való felhasználás

Az algák segítségével igen hatékony szennyvíz-tisztító rendszer alakítható ki. Napjainkban a hagyományos technológia jelentős mechanikai energiaigénnyel jár. A tisztító hatás az algák esetében a nap energiájának segítségével valósítható meg, és számukra egyes szennyezőanyagok tápanyagként jól hasznosíthatók [16].

A szennyvíztisztítással összekötött biogáz-előállítás és az algatermesztés ugyan külön-külön is alkalmas megfelelő ártalmatlanításra, ám együttesen sokkal hatékonyabb módon képesek tisztítani a bevezetett szennyvizet. Ennek oka, hogy az anaerob mikroorganizmusok a szennyvízben található szerves anyagok lebontását végzik, míg az algák a szerves (a biogázüzem által könnyebben felvehető formába átalakított) tápanyagok felhasználására alkalmasak, így szennyvíztisztítási szempontból kiegészítik egymást. Ugyanakkor az algák – sokféle egyéb felhasználási lehetőségen kívül – akár biogáz-előállításra is felhasználhatók, ilyen módon lehetővé teszik akár teljesen zárt tisztítórendszerek létrehozását is, aminek elsősorban olyan biogáz-üzemek működtetésénél lehet jelentősége, amelyek nem rendelkeznek szántófölddel. A biogáz-

üzem és az algatelep külön-külön is képes többféle (hő, villamos áram, hajtóanyag) megújuló energia előállítására [5].

A vizsgált szennyvizek 14-21 napos algakezelése során a nitrogén-tartalom 82-89%-kal, a foszfor-tartalom 70-81%-kal, a kémiai oxigénigény 39-91%-kal csökkenthető [17]. Ezenkívül a mikroalga sejtfala olyan szerkezetű, amely képes a szennyvízben lévő mérgező anyagok felszívására is. Így a mikroalgák potenciálisan alkalmasak számos vegyület, köztük a nitrogén, a foszfor, a nehézfémek és más szennyező vegyületek csökkentésére is a szennyvizekben [18].

Az alga-alapú biogáztermelés

Az algatechnológia a kapcsolódó biogáztelep szerves részévé tehető, utóbbi az alapanyag (kierjedt, szeparált szennyvíz) biztosításában, a termésközelítésben (hulladék, széndioxid) és az esetleges végtermék-hasznosításban (az alga-biomassza anaerob oxidációjában) is fontos szerepet játszhat. Az alga-alapú szennyvíztisztítás tehát megoldást nyújthat a biogázüzem veszendőbe menő melléktermékeinek teljeskörű hasznosítására és ártalmatlanítására. A biogáztelep pedig könnyebben felvehető állapotba hozza az algában található N és P tápanyagokat, emellett biometánt is termel, ami károsanyag-kibocsátási és gazdaságossági szempontból is lényeges lehet [19].

Az alga biogázüzemi visszatáplálása a legkisebb töke- és energiaigényű, külön marketingmunkát nem igénylő, piaci kockázatokkal nem terhelt változatnak tekinthető az algahasznosítás energetikai változatai közül, mely saját földterület hiányában is alkalmazható. A biogáz-üzemek által kibocsátott tisztított szennyvíz további gázosításra már nem alkalmas, azonban még jelentős makro- és mikroelem-, valamint kierjedt szervesanyag-tartalommal bír. Ezáltal ezek a szennyvizek eredeti állapotukban élővizekbe nem vezethetők, az algával történő további tisztítást követően viszont már igen.

Az algákból kinyerhető biogáz mennyisége elsősorban az adott algafaj összetételétől, az algatermesztés technológiájától és az előkezelés módjától, az alkalmazott oltóanyagtól, valamint az adott biogáz-üzemi receptúra egyéb alkotórészeitől függ [20]. Általában igaz, hogy a szubsztrátum szerves szárazanyag tartalmának növekedése a képződő biogáz mennyiségének növekedésével jár. Az egyes alapanyagok elméleti gázkihozatalát és ennek metántartalmát alapvetően meghatározza azok fehérje-, zsír- és szénhidrát tartalma (1. táblázat).

Megnevezés	Gázkihozatal		
	Biogázhozam (Nm ³ /kg sze.a.)	Metánhozam (Nm ³ /kg sze.a.)	
Zsír/lipid	1,4 (70-90% metántart.)	1,425 (69,5% metántart.)	1,014
Fehérje	0,7 (60-70% metántart.)	0,921 (68,8% metántart.)	0,851
Szénhidrát	0,6 (40-60% metántart.)	0,830 (50% metántart.)	0,415
Referencia	[21]	[22]	[19]

Mussnug et al. (2010) kísérletei szerint a legjobb biogáztermelésre a *Chlamydomonas reinhardtii* (587 Nm³/t +/- 9% sze.a.), a legkisebb hozamra pedig a *Scenedesmus obliquus* (287 Nm³/t +/- 10%) képes [23]. Az algából kinyerhető biogáz minősége – ugyanezen kísérletek alapján – 7-13%-kal múlta felül a kukoricaszilázsából előállítható biogáz metántartalmát. A *C. reinhardtii* – receptúrában al-

kalmazva – jelentős hidrogén-termelő képessége miatt – 23%-kal növelte a biogázhozamot. Mindez annak köszönhető, hogy – más energianövényekkel összehasonlítva – az algák jóval kevesebb cellulózt tartalmaznak, lignin egyáltalán nem található bennük, ezért lebontásuk jóval egyszerűbb, a biogáz-termelés első mikrobiológiai szakasza (a hidrolízis) pedig sokkal hatékonyabban játszódik le.

Az algák átlagos biogáz-hozamára vonatkozó korábbi kísérleti eredmények:

- 210-280 Nm³/t sze.a. [24]
- 300 Nm³/t sze.a. [25]
- 420-500 Nm³/t sze.a. [26]

A nagy fehérje-tartalmú (alacsony C/N arányú) mikroalgákból az anaerob oxidáció során felszabaduló ammónia és NH₄-ionok elsavasíthatják a mikrobiológiai rendszert, ezáltal lassíthatják, esetleg le is állíthatják a biogáz-képződést, különösen termofil hőfokon történő elgázosítás esetén [27]. Ez a toxicitás a szénarány növelésével csökkenthető. Fontos azonban megjegyezni, hogy nem minden szénben gazdag hulladék/szubsztrát alkalmas az együttermelésre.

Hasonló gátló hatása lehet a 200 mg/l koncentráció fölötti kén-tartalomnak, amelyek egyes édesvízi algákban lehetnek jelen nagyobb mennyiségben.

Az elmúlt években számos jelentés látott napvilágot, amelyek a metánhozam jelentős növekedését jelzik az alga-biomassza más hulladékokkal való anaerob együttermelés során, mint például sertés-, illetve marhatrágya, glicerin, papír, élelmiszer-hulladék, búzaszalma, étolaj, és visszamaradó eleveniszap [28,29,30,31].

Következtetések

Az olcsó alga-előállítás egyik alapfeltétele a jelentős mennyiségű és olcsó tápanyag, valamint a megfelelő fény- és hőmérsékleti feltételek. Indiában az éghajlat lehetővé teszi az alga egész éves betakarítását az élővizekből. Ugyanakkor a tiszta vízű tavakban a tápanyaghiány korlátozhatja a termelést. Alga-előállítás céljára hasznosított természetes tavakban a szükséges tápanyagokat megfelelő mennyiségű és minőségű szennyvíz betáplálásával van lehetőség legolcsóbb módon pótolni addig, amíg a széndioxid nem lép be terméskorlátozó tényezővé, hiszen ennek pótlása csak zárt rendszerekben lenne megoldható.

A biogáz-üzemi technológiába integrált alga-előállítást a következő tényezők indokolhatják:

- A gázmotorokban képződő füstgáz az algatavakban ártalmatlanítható, a hulladékot pedig felhasználható az algatavak fűtésére (kogenerációs technológia esetén).
- A biogáz tisztításakor a leválasztott széndioxid közvetlenül a tavakba vezethető.
- A kierjesztett trágya szervesanyag-tartalma (megfelelő koncentrációban) szintén alga-biomasszává alakítható.
- Az előállított algamennyiség részben, vagy teljes egészében biogáz előállítására is felhasználható.

Az algák alacsony C/N aránya jóval kisebb az optimumnál, amiből következően az algák csak más, magas szénhidrát-tartalmú anyagokkal együtt használhatók fel erjesztésre.

A jövőben úgy véljük, hogy az – elsődlegesen energetikai célú – algatermesztés hazánkban a szennyvíz-ártalmatlanításban, az erőművek által kibocsátott széndioxid-hasznosításban, valamint a magas szervesanyag-tartalommal rendelkező, vagyis leginkább a

részben tisztított szennyvizet befogadó tavakban, illetve félintenzív technológiájú, fóliával borított tavas rendszerekben lehet perspektivikus. A biogáz-üzemek mind az algatermesztésre, mind az algahasznosításra alkalmasak, ezért úgy véljük, a jövőbeli fejlesztések vonatkozásában érdemes lehet megfontolni a normál biogáz-üzemi technológiák és az algatermesztés integrálását.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megjelenését támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „Alga biomasszából előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások” című, 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 azonosítószámú pályázata.

Irodalom

- [1] Bai, A.: Biogáz-üzemi algarendszerek méretezése. Konferencia közlemény. In: Nagy, Z. B. (szerk.) 57. Georgikon Napok Tudományos Konferencia. Keszthely, Magyarország: Pannon Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar. pp. 16-20. 2015.
- [2] Araujo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., Tasende, M. G., Ghaderiardakani, F., Ilmjärvi, T., Laurans, M., Monagail, M. M., Mangini, S., Peteiro, C., Rebours, C., Stefansson, T., Ullmann, J.: Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1247. 2021.
- [3] Ma, C., Wen, H., Xing, D., Pei, X., Zhu, J., Ren, N., Liu, B.: Molasses wastewater treatment and lipid production at low temperature conditions by a microalgal mutant *Scenedesmus* sp. Z-4. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1), 1-13. 2017.
- [4] Bhushan, S., Kalra, A., Simsek, H., Kumar, G., Prajapati, S. K.: Current trends and prospects in microalgae-based bioenergy production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104025. 2020.
- [5] Bai, A., Gabnai, Z.: Energianyeréssel kombinált innovatív szennyvízkezelési eljárások. Konferencia közlemény. In: Nagy, B. (szerk.) 56. Georgikon Napok Tudományos Konferencia. Keszthely, Magyarország: Pannon Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar pp. 25-34. 2014.
- [6] Bai, A., Vaszkó, G., Csányi, F., Tózsér, B.: Algák: Mikroméretben hatalmas lehetőségek? Innotéka. Tudomány, Innováció, Zöldgazdaság. 2:11 pp. 43-46. 2012.
- [7] Milbrandt, A., Jarvis, E.: Resource Evaluation and Site Selection for Microalgae Production in India. Technical Report, NREL/TP-6A2-48380. 2010.
- [8] Chanakya, H. N., Mahapatra, D. M., Ravi, S., Chauhan, V. S., Abitha, R. Sustainability of large-scale algal biofuel production in India. *Journal of the Indian Institute of Science*, 92(1), 63-98. 2012.
- [9] Moheimani, N.R. and McHenry, M.P.: Developments of five selected microalgae companies developing “closed” bioreactor biofuel production systems. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 7(4), pp. 367-386. 2013.
- [10] Kumar, P., Prajapati, S. K., Malik, A., Vijay, V. K.: Evaluation of biomethane potential of waste algal biomass collected from eutrophied lake: effect of source of inocula, co-substrate, and VS loading. *Journal of Applied Phycology*, 31(1), 533-545. 2019.
- [11] Kang, A.: Protection and management of urban lakes in India. Technical Report. URL: <http://www.cseindia.org/userfiles/Lake Protection and Management of Urban Lakes in India.pdf>. 2014.
- [12] Roy, D.: Revival of Hauz Khas lake in Delhi: Approaches to urban water resource management in India. *Journal of Management and Sustainability*, 6:73. 2016.
- [13] Naik, S. N.: Use of CO₂ in micro-algal biomass production enhancement. In: Borgvang S. A. (ed.) International workshop on algae technology, hydrogen production and use of algae biomass. Kolkata, India, p 16. 2011.
- [14] Dhup, S.: Isolation, characterization and large scale cultivation of algae for lipid production. PhD thesis. TERI University, New Delhi, India. URL: <http://hdl.handle.net/10603/139526>. 2016.
- [15] Kumar, P., Prajapati, S. K., Malik, A., Vijay, V. K.: Cultivation of native algal consortium in semi-continuous pilot scale raceway pond for wastewater treatment coupled with methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6):5581–5587. 2017.
- [16] Grasselli, G., Szendrei, J.: Possibilities of algae in biomass energy and food production through gas emission mitigation. *Hungarian Agricultural Engineering*, No. 24/2012, p. 71-75. HU ISSN 0864-7410. 2012.
- [17] Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y., Ruan, R.: Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Appl Biochem Biotechnol* 162:1174–1186. DOI: 10.1007/s12010-009-8866-7. 2010.
- [18] Bhushan, S., Simsek, H., Krishna, A., Sharma, S., Prajapati, S. K.: Remediation of domestic wastewater using algal-bacterial biotechnology. In *Application of microalgae in wastewater treatment*, pp. 269-289. Springer, Cham. 2019.
- [19] Sialve, B., Bernet, N., Bernard, O.: Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, 27(4):409-416. 2009.
- [20] Ward, A. J., Lewis, D. M., Green, F. B.: Anaerobic digestion of algae biomass: a review. *Algal Research*, 5, 204-214. 2014.
- [21] Barótfi, I.: Energia-felhasználói kézikönyv. ISBN 963-02-9535-0 Széchenyi Nyomda, pp. 983-985. 1996.
- [22] Alves, M. M., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Cavaleiro, A. J., Picavet, M., Smidt, H., Stams, A. J.: Waste lipids to energy: how to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). *Microbial Biotechnology*, 2(5):538-50. 2009.
- [23] Mussgnug, J. H., Klassen, V., Schlüter, A., Kruse, O.: Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept, *Journal of Biotechnology*. 150(1):51-56. ISSN: 0168-1656. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2010.07.030. 2009.
- [24] Sukias, J. P. S., Craggs, R. J.: Digestion of wastewater pond microalgae and potential inhibition by alum and ammoniacal-N. *Water Science and Technology*. 63:835–840. 2011.
- [25] Oswald, W. J., Golueke C. G.: Biological transformation of solar energy. *Advances in Applied Microbiology*, 2, 223-262. 1960.
- [26] Kaltwasser, B. J.: Biogáz- előállítás és hasznosítás. ISBN: 963-10-4990-6. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp. 45-46. 1983.
- [27] Markou, G., Angelidaki, I., Georgakakis, D.: Carbohydrate-enriched cyanobacterial biomass as feedstock for bio-methane production through anaerobic digestion. *Fuel*, 111:872-879. 2013.
- [28] Beltrán, C., Jeison, D., Fierro, F. G., Borja, R.: Batch anaerobic co-digestion of waste activated sludge and microalgae (*Chlorella sorokiniana*) at mesophilic temperature. *Journal of Environmental Science and Health. A* 51(10):847–850. 2016.
- [29] Rétfalvi, T., Szabó, P., Hájos, A. T., Albert, L., Kovács, A., Milics, G., Ördög, V.: Effect of co-substrate feeding on methane yield of anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris*. *Journal of Applied Phycology*. 28:2741-2752. 2016.
- [30] Zhen, G., Lu, X., Kobayashi, T., Kumar, G., Xu, K.: Anaerobic co-digestion on improving methane production from mixed microalgae (*Scenedesmus* sp., *Chlorella* sp.) and food waste: kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 299:332-341. 2016.
- [31] Solé-Bundó, M., Eskicioglu, C., Garfí, M., Carrère, H., Ferrer, I.: Anaerobic co-digestion of microalgal biomass and wheat straw with and without thermo-alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*. 237:89–98. 2017.

Módszertani alkalmazási lehetőségek az algatermesztés, a biogáz-előállítás és a PtG-technológia vizsgálata során

Balogh Péter

egyetemi tanár, balogh.peter@econ.unideb.hu

Czine Péter

egyetemi tanársegéd, czine.peter@econ.unideb.hu

Gabnai Zoltán

tudományos munkatárs, gabnai.zoltan@econ.unideb.hu

Bai Attila

egyetemi tanár, bai.attila@econ.unideb.hu

A megújuló energia egyre növekvő mennyiségének termelése miatt a jövőben komoly kihívást jelenthet a többletenergia eltárolása is, ezért cikkünkben megpróbáljuk bemutatni azokat a statisztikai módszertani eljárásokat, amelyeket a nemzetközi szakirodalomban leginkább alkalmaznak az algabiomassából származó biogáz előállítása és az így előállított gázból történő biológiai metanizáció elemzése során. Ebben a folyamatban egy mikroorganizmus (pl. alga) katalizátor szerepet tölt be és ezek a mikroorganizmusok képesek a szén-dioxidból metánt előállítani. Ez azért nagyon fontos, mert így a power-to-gas folyamat nemcsak energiatárolási funkcióval rendelkezik, de dekarbonizációs hatása is van, mivel újrahasonosítjuk a szén-dioxidot.

*

Due to the increasing production of renewable energy, the storage of excess energy could be a major challenge in the future, and in this article we try to present the methodological procedures that are most widely used in the international literature for the production of biogas from algal biomass and the biological methanation of the gas produced. In this process, a micro-organism (e.g. algae) acts as a catalyst and these micro-organisms are able to produce methane from carbon dioxide. This is very important because the power-to-gas process not only has an energy storage function, but also a decarbonisation effect, as carbon dioxide is recycled.

Az elmúlt évtizedekben a kutatók számos tanulmányt publikáltak a megújuló energia előállításával kapcsolatban. Ezek között az elmúlt időszakban megjelentek olyan cikkek, amelyekben már az ilyen típusú energiaforrások hosszú távú gazdaságos és ugyanakkor környezetbarát tárolásának lehetőségét is elemezték. Az általunk vizsgált adatbázisok között a Scopus, a Science Direct és a Google Scholar szerepeltek. Célunk az volt, hogy felmérjük azoknak a publikációknak a számát, amelyek címe, kulcsszavai vagy összefoglalói tartalmazzák a következő kereső kifejezések kombinációját: „power to gas” és az „algae”. Így képet kaptunk az ebben a témában 2021-ig eddig megjelent publikációk számáról és minőségéről. A Scopusban 607 cikket, a Science Direct-ben 26420 cikket és a Google Scholar-ban 188 000 cikket jelöltek meg a kereső szoftverek. Természetesen ebből az igen jelentősnek mondható mennyiségből megpróbáltuk kiválasztani azokat, amelyek mintául szolgálhatnak a különböző módszertani alkalmazások bemutatására. Az általunk megvizsgált publikációk egy részében a leíró statisztikai elemzések és a különböző hipotézis vizsgálatok statisztikai módszerei nagy átfedést mutattak, ami arra utalhat, hogy közös elemzési megközelítés alakítható ki, ha a megújuló energiával kapcsolatban szeretnénk eredményeket tudományosan közölni.

A következőkben összefoglaló jelleggel – a teljesség igénye nélkül – bemutatjuk, hogy melyek azok a főbb statisztikai mutatók és eljárások, amelyeket a nemzetközileg elfogadott kutatók leginkább számítanak és alkalmaznak a megújuló energiával kapcsolatos tudományos eredményeik közlése során.

Leíró statisztikai mutatók

A leggyakrabban előforduló kifejezés az átlagok bemutatására vonatkozott, de ezen kívül nagyon sok esetben a varianciát vagy a szórást is közölték a szerzők. Az adatgyűjtések egy részében ismertetésre került még az átlag hibája vagy a 95%-os konfidencia intervallum is [1-6].

Paraméteres próbák hipotézis vizsgálatai

A skála típusú adatok elemzésének alapvető eszközeként alkalmazták a normalitás vizsgálat néhány tesztjét (pl. Kolgomorov-Smirnov próba, Shaphiro-Wilk próba).

Az eltérő csoportok varianciáinak összehasonlítása az F-próbával (Levene teszt) történt. Ez a próba szinte minden esetben előfeltétele volt a 2 független mintás t-próbáknak [7]. Abban az esetben amikor két időpontban mért érték összehasonlításra került sor a párosított mintás t-próbákat alkalmazták [8].

A kettőnél több csoport átlagának elemzése az egy utas varianciaanalízis (One-way ANOVA) segítségével volt lefuttatva [9]. Ha a csoportosító változón kívül valamilyen mért paraméter (skála típusú adat) is befolyásolhatta az eredményt akkor a kovarianciaanalízis (ANCOVA) volt a választott elemzési eljárás [10].

Az általános lineáris modellek (GLM) abban az esetben kerültek alkalmazásra, amikor az egyes modell paraméterek a hatótényezők lineáris, négyzetes és interakciós kapcsolatát is kimutatták.

Ha a csoportosító változók közül a kutatók legalább kettőnek a hatását szerették volna kimutatni a két utas varianciaanalízist (Two-way ANOVA) választották.

Több esetben is előfordult, hogy ugyanannak a változónak időben többször figyelték meg és gyűjtötték be a kísérleti adatait, ekkor az ismételt mérés varianciaanalízis (Repeated measure ANOVA) került alkalmazásra [11].

A különböző ANOVA modellek esetében az azonos vagy eltérő elemszámú csoportok különbségeit az un. Post-Hoc tesztek segítségével elemezték tovább. Ezekben az esetekben két lehetőség állt a kutatók rendelkezésére. Az egyik az azonos varianciák esetében kivitelezhető eljárás csoport volt. Ezek között leginkább a legkisebb négyzetes módszerét (LSD), a Bonferroni, a Sidak [10], a Scheffe [9], a Tukey és a kontroll kategóriával rendelkező Dunnett teszt szerepelt. A másik eljárás csoport esetében az eltérő varianciák miatt kellett más típusú teszteket alkalmazni. Ezek között legtöbbször a Tamhane's T, a Dunnett's és a Games-Howell tesztek fordultak elő.

Nem paraméteres próbák hipotézis vizsgálatai

Általánosságban megállapítható, hogy ha a kutatók ordinális mérési szintű változókkal dolgoztak vagy esetleg a skálátípusú értékek nem voltak normális eloszlással jellemezhetőek, akkor az ún. nem paraméteres eljárásokat részesítették előnyben. Ezek között talán a legegyszerűbb és leginkább használt eljárás az volt, amikor két rangátlatot viszonyítottak egymáshoz a Mann-Whitney U-próba (2 független mintás rangátlat próba) segítségével. Más esetekben, amikor legalább három vagy több csoportra bontották a kísérleti adatokat, az egy utas nem paraméteres ANOVA (Kruskal-Wallis rangátlat teszt) eljárás került alkalmazásra. Ha időben többször történt megfigyelés akkor az ismételt méréses adatok nem paraméteres összehasonlítása (Friedman próba) volt futtatva.

Korreláció és regresszió elemzés

Számos kutató alkalmazta a legkisebb négyzetek elvén alapuló korreláció és regresszió számítását. Ennek során a determinációs együtthatót és a módosított R^2 -et használták a modell illeszkedés jellemzésére. Természetesen az általános regressziós modell jóságát az ún. globális F-próbával is elemezték és azokban az esetekben amikor nem volt megfelelő a modell illeszkedés ezen jellemzője, további tényezőket vontak be az elemzésbe esetleg más típusú modellt állítottak fel. A jó illeszkedést mutató modelleknél külön-külön is megvizsgálták a regressziós függvény paramétereit a t-próbák segítségével.

Számos cikkben a modellek maradéktagjainak vizsgálatára a maradékok valószínűségi ábrája szolgált, amely a maradékok és a modell előre jelzett értékei közötti összefüggést mutatja.

Attól függően, hogy a kutatók milyen összefüggést feltételeztek az általuk beállított kísérletek során eltérő típusú modellek kerültek tesztelésre. Ezek közül leginkább a lineáris modellek és a másodfokú összefüggéseket tartalmazó modellek kerültek bemutatásra, de számos esetben az interakciót feltételező modellek is le lettek futtatva és elemezve [12].

Az életciklus-elemzés (life-cycle assessment, LCA)

Az életciklus-vizsgálat egy termék, folyamat vagy szolgáltatás teljes életútja során vizsgálja annak környezetre gyakorolt potenciális hatásait. Az életciklus-értékelés (LCA) kulcsfontosságú szerepet játszik a biomaszából bioüzemanyaggá történő átalakítás folyamatának különböző környezeti hatásainak értékelésében. Chia et al. (2018) szerint a különböző típusú alga termesztési rendszerek eltérő nettó energiafogyasztással járnak, és az összehasonlító energetikai LCA-t a különböző termesztési módszerek, például a nyitott vagy zárt rendszer alapján számítják ki [13].

Az életciklus számításhoz rendelkezésre állnak szoftverek, ill. olyan adatbázisok, melyek az illető szolgáltatás, anyag, termék adatait, előállításának anyag- és energiaméregét, azok melléktermékeit tartalmazza. A két leginkább alkalmazott program az LCA Calculator (a szénlábnyomot adja, fenntartható tervezési megoldásokat választhatunk több változat összehasonlításával, ez egy felhőalapú szoftver) és a Core77 Life Cycle Analysis Calculator (szabadon használható online program, melynek segítségével megbecsülhető egy termék szénlábnyoma).

Többváltozós adatelemzési technikák

Főkomponens elemzés (PCA)

Általában kvantitatív eszközként használják a dimenziócsökkentés elvégzésére egy nagyon részletes adatbázison. A kísérleti változók

és megfigyelések közötti kapcsolat megállapítására is felhasználható a PCA által kapott új koordináta-térben történő magyarázat segítségével. A PCA előnye, hogy egy nagy dimenziós teret alacsony dimenziós térré tömörít, miközben az eredeti adathalmaz varianciájának jelentős részét továbbra is megragadja.

A PCA által generált grafikus kimenetnek három fő formája van:

Az első grafikus kimenet a változók faktortérképe, ami a megfigyelt kísérleti változókat mutatja az első két főkomponensből álló kétdimenziós síkon. Az így kapott ábra a mért változók és a hozzájuk tartozó főkomponensek közötti kapcsolatot szemlélteti.

A második grafikus kimenet az egyének faktortérképe, amely az egyének pontszámait ábrázolja az első két főkomponensen.

A harmadik grafikus kimenet a terhelési faktortérkép vagy egy teljes táblázat eredménye, amely tartalmazza az egyes főkomponensek által magyarázott variancia százalékos arányát és sajátértékét is.

Több Szempontú Döntéshozatali Módszerek (MCDM)

A PROMETHEE (Preferencia rangsorolási értékelési módszer a gazdagsági értékelésekhez), amely a döntések rangsorolásának egyik módszere, és a GAIA (Grafikus elemzés az interaktív támogatáshoz), amely egy vizuális adatmegjelenítési módszer. Ezek olyan módszerek példái, amelyek többváltozós problémák esetében segítik a döntéshozatalt.

A PROMETHEE úgy hajtja végre a rangsorolást, hogy minden egyes kísérleti változóra optimalizálási kritériumot alkalmaz (azaz maximalizálja vagy minimalizálja azt), majd ezt követően kiszámítja a preferenciaáramlásokat. A GAIA alkalmazása különösen hasznos segítség, mivel az adatok megjelenítését főkomponensek (PCA) bi-plotjai formájában biztosítja és emellett egy döntési tengelyt is megjelenít, amely a döntés minőségét jelzi.

A kísérletek tervezése a Válaszfelület Módszertannal (RSM, response surface methodology)

Ez a technika több magyarázó változó és egy vagy több válaszváltozó közötti összefüggést tárja fel és a tervezett kísérletek sorozatát használja az optimális válasz elérése érdekében.

Box és Wilson javasolt egy másodfokú polinom modell használatát (pl. a biodízel-előállítás fél-normális valószínűségi diagramja) 2 szintű, teljes faktoriális terv esetében, illetve a 3D felszín- és a kontúr ábrázolás segítségével.

A válaszfelület-módszertan (RSM) célja a független változók (tényezők) optimalizálása egy várható mért válaszhoz pl. az olajhozam lehet a válaszváltozó, más néven a függő változó.

Az RSM megközelítést a központi összetett tervezési mátrixon (CCD) keresztül alkalmazzák a kísérleti tervezéshez és a független tényezők optimalizálásához. A vizsgált független tényezők lehetnek pl. a következők: reakcióhőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), reakcióidő (perc), metanol-alga arány (tömegszázalék). A nyers biodízelhozam optimalizálásához a CCD-mátrixban használt független tényezők eltérő szintjei fordulhatnak elő.

Az előzőeken kívül további egyszerűbb ábrákat is alkalmazhatunk még, mint például a Pareto-diagram, amely a válaszváltozók, pl. a sejtproduktivitás (QP) és a lipidtartalom (%) statisztikai elemzését mutathatja be. A sávok a válaszváltozókkal kapcsolatos standardizált hatásokat (számított t értékek) mutatják. Így a függőleges vonalat (kritikus t érték) meghaladó sávokkal ábrázolt változók 95%-os vagy 90%-os megbízhatósági szinten statisztikailag szignifikánsak.

Mesterséges neurális hálózatok (ANN)

Srivastava és mts. (2018) egyik tanulmányukban az ANN-technikát használták a folyamatváltozók optimalizálására [14]. Az ANN egy olyan számítási modell, amely az emberi agy információfeldolgozó rendszerén alapul. Többnyire három szakaszból áll; egy bemeneti rétegből, egy kimeneti rétegből és néhány rejtett rétegből. Minden rétegnek vannak adott számú kis egyedei, az úgynevezett neuronok és a feldolgozó komponenseik. Az ANN-modell javítása érdekében a hálózatot két szakaszban működtetik, a képzési/tanulási szakaszban és a tesztelési/ellenőrzési szakaszban. Az ANN-folyamat teljesítménye az MSE (RMSE) és a korrelációs együtthatók (R^2) alapján fejezhető ki.

A genetikus algoritmus (GA)

Ez egy egyszerű és hatékony általános célú sztochasztikus optimalizálási módszer, amelyet a populációgenetika darwini evolúciójának ötletén alapul. A legnagyobb előnye ennek a módszernek, hogy a legoptimálisabb megoldást globálisan generáljuk a lokális optimum számítása helyett.

Az alkalmazott statisztikai adatelemző programok

A kutatók rendelkezésére nagyszámú elemző szoftver áll, de ugyanakkor az általunk vizsgált cikkekben limitált volt az alkalmazott programok száma. Elsősorban az SPSS program különböző verzióit használták a számítások kivitelezésére. Ezek közül az SPSS 19-estől leginkább az SPSS 25-ös verziójáig találtunk eredményeket.

Az „MSTAT-C software” több cikkben is alkalmazásra került, mivel ez egy olyan integrált program, amely képes segíteni a mezőgazdasági kutatókat a mezőgazdasági kutatás legtöbb lépésében - azaz a kísérleti tervek létrehozásában, az adatok kezelésében és átalakításában, valamint a kísérletek biológiai és gazdasági szempontból történő elemzésében is.

Egy másik gyakran használt program volt a MINITAB több verziója (Minitab 10. – 16.). Ez egy egységes, egyszerűen használható, átfogó statisztikai szoftver, melyet főleg mérnökök és minőségügyi szakemberek használnak folyamatok megismerésére és javítására. Ez a szoftver külön foglalkozik a minőségüggyel, azaz tartalmazza az alapvető minőségügyi technikákat: pl. Pareto és Ishikawa (ok-okozati) diagram, adathalmazelemzés, ellenőrzőkártyák, folyamatképeség vizsgálata, a kísérlettervezés, a regresszió- és szórásanalízis, a válaszfelületmódszer és megbízhatósági vizsgálatokra is alkalmazták.

A Design Expert® különböző verziói (version 7.0 - 11.0) nagy segítséget nyújtottak számos kutató számára abban, hogy a nagy teljesítményű többtenyezős tesztelési eszközöket könnyen és gyorsan használhassák. Segítségével a létfontosságú tényezők és összetevők szűrése, a kölcsönhatások jellemzése, és végül az optimális folyamatbeállítások és termékreceptek elérése is megvalósítható volt. A kontúrokat a 2D grafikonokon és a válaszfelületet a 3D ábrákon vizsgálták.

Több cikk esetében a kutatócsoport tagjai a MATLAB programozási nyelvet alkalmazták azért, hogy lerövidíthessék a szimuláció időtartamát ezzel nagyban segítve az elemzések kivitelezését.

A fizetés statisztikai programokon kívül leginkább a szabadon felhasználható ún. R programot láttuk alkalmazni, amelynek különböző csomagjai vannak (pl. Vegan, ggplot2, FactoMineR, Psych). Ennek a programnak is a sajátossága, hogy parancsokat kell begépelni és ezek kijelölésével lehet lefuttatni a kívánt elemzési eljárásokat.

Ezért a felhasználónak minimális programozási ismereteinek kell lennie.

Következtetések

Az általunk elemzett cikkek alapján arra a megállapításra juthatunk, hogy a különböző szerzők nagyon sok módszertani eljárás (a leíró statisztikai mutatóktól a többváltozós regressziós elemzési technikáig) segítségével közlik az eredményeiket, de ugyanakkor van néhány általánosan alkalmazott nagyon modern statisztikai mutató és módszer is.

Ezek a következők:

- Több Szempontú Döntéshozatali Módszerek (MCDM)
- Válaszfelület Módszertan (RSM)
- Mesterséges Neurális Hálók (ANN)
- Genetikus Algoritmus (GA)

Ezen módszerek és eljárások ismerete és alkalmazása elengedhetetlen ahhoz, hogy a nemzetközi tudományos élet szereplőivel megismertethessük az eredményeinket. Véleményünk szerint ezeknek a technikáknak a használata és összefoglalása segítséget adhat a hazai kutatóknak abban, hogy sikeresen publikálhassanak nemzetközileg magasán jegyzett tudományos folyóiratokban is.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megjelenését támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal „Alga biomasszából előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások” c. 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 sz. pályázata.

Irodalom

- [1] O. M. Adeniyi, U. Azimov, A. Burluka, (2018) Algae biofuel: Current status and future applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90 316-335.
- [2] V. Andersson, S. B. Viklund, R. Hackl, M. Karlsson, T. Bernström (2014) Algae-based biofuel production as part of an industrial cluster, *Biomass and Bioenergy*, 71 113-124.
- [3] A. Doshi, S. Pascoe, L. Coglan, T.J. Rainey, (2016) Economic and policy issues in the production of algae-based biofuels: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64 329-337
- [4] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb, (2016) *Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review*, *Renewable Energy*, 85, 1371-1390,
- [5] Kumar, P., Prajapati, S.K., Malik, A. et al. (2019). Evaluation of biomethane potential of waste algal biomass collected from eutrophied lake: effect of source of inocula, co-substrate, and VS loading. *Journal of Applied Phycology* 31, 533–545. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1585-0>
- [6] Kumar, P., Bhattacharya, A., Prajapati, S.K. et al. Anaerobic co-digestion of waste microalgal biomass with cattle dung in a pilot-scale reactor: effect of seasonal variations and long-term stability assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery* (2020). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00778-y>
- [7] Kumar, P., Prajapati, S.K., Malik, A. et al. (2017) Cultivation of native algal consortium in semi-continuous pilot scale raceway pond for greywater treatment coupled with potential methane production, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6) 5581-5587. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.044>.

- [8] Deže, D., Mihaljević, M., Kovačić, Đ. et al. Natural Communities of Microalgae and Cyanobacteria from Eutrophicated Waters as Potential Co-substrates for Small-scale Biogas Production. *Appl Biochem Biotechnol* 192, 1016–1028 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03382-y>
- [9] H.W. Chen, T.S. Yang, M.J. Chen, Y.C. Chang, C.Y. Lin, E.I.C. Wang, C.L. Ho, K.M. Huang, C.C. Yu, F.L. Yang, S.H. Wu, Y.C. Lu, L.K.P. Chao, (2012) Application of power plant flue gas in a photobioreactor to grow *Spirulina* algae, and a bioactivity analysis of the algal water-soluble polysaccharides, *Bioresource Technology*, 120, 256-263.
- [10] Mulbry, W., Kondrad, S. & Buyer, J. Treatment of dairy and swine manure effluents using freshwater algae: fatty acid content and composition of algal biomass at different manure loading rates. *Journal of Applied Phycology* 20 1079–1085 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9314-8>
- [11] P. Xu, E.R. Xiao, F. He, D. Xu, Y. Zhang, Z. Wu, (2021) Microbial fuel cell improves restoration of *Hydrilla verticillata* in an algae-rich sediment microcosm system, *Chemosphere* 266.
- [12] Patil, P. D., Gude, V. G., Mannarswamy, A., Deng, S., Cooke, P., Munson-McGee, S., Rhodes, I., Lammers, P., & Nirmalakhandan, N. (2011). Optimization of direct conversion of wet algae to biodiesel under supercritical methanol conditions. *Biore-source technology*, 102(1), 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.031>
- [13] Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Yap, Y. J., Ong, H. C., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2018). Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review. *Biotechnology journal*, 13(6), e1700618. <https://doi.org/10.1002/biot.201700618>
- [14] G. Srivastava, A.K. Paul, V.V. Goud (2018) Optimization of non-catalytic transesterification of microalgae oil to biodiesel under supercritical methanol condition, *Energy Conversion and Management*, 156, 269-278.

Alga biomassából előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások – 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061

(Debreceni Egyetem, mint konzorcium vezető, Pannon Egyetem és a Power-to Gas Hungary Kft, mint konzorciumi tagok)

A projekt időtartama: 2021.01.01 – 2023.12.31

A projekt középpontjában a természetes vizekben található algabiomassából származó biogáztermelés, valamint ennek hasznosíthatósága áll, mely rendkívül innovatív téma. Az indiai fél által elvégzett erjesztési kísérletekben az alga biogáztermelését nemcsak önmagában, hanem egyéb alapanyagokkal (pl. szarvasmarha-trágya) együttesen is értékeljük. Ezek alapján javaslatokat fogalmazunk meg a biogáz-termelés céljára optimálisnak tekinthető algafajok és biogáz-üzemi receptúrák vonatkozásában. A biogázt hazánkban és az EU-ban túlnyomórészt villamos árammá alakítják át, azonban ennek tárolása problematikus. A projektben a biogáz-hasznosításra alkalmazott PtG (Power-to-Gas) technológia ennek megoldására nyújt egy perspektivikus és újszerű lehetőséget. A műszaki tesztek elvégzésén kívül értékeljük a folyamat környezetvédelmi hatásait, az egyéb áramhasznosítási lehetőségeket (pl. elektromos járművek üzemanyag-ellátása), valamint komplex gazdasági értékelést is végzünk. Az indiai fél kiemelkedő szakértelemmel rendelkezik az algaalapú biometán-előállítás, valamint az algatermesztés területén, a hazai műszaki kísérleteket kiváló hazai referenciákkal és szabadalmakkal rendelkező cég, az eredmények kiértékelését pedig két felsőoktatási intézmény témában elismert kutatói végzik. Úgy véljük, hogy a hazai energiapolitika, valamint a kapcsolódó tevékenységekkel foglalkozó vállalkozások számára hasznos információ lehet ezen innovatív technológia műszaki-gazdasági-környezetvédelmi hatásainak ismerete.


NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROJEKT

Power-to-Methane alapú pszeudo-akkumulátorok

Kummer Kristóf^{1,2}

MSc hallgató, EK2 ösztöndíjas

Prof. Dr. Imre Attila^{1,2}

egyetemi tanár, tudományos tanácsadó, imreattila@energia.bme.hu

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

² Energetikai Kutatóközpont, H- 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A tanulmányban ismertetünk egy kisméretű, moduláris, zárt rendszerű Power-to-Methane energiátároló rendszert. Bár a technológia a kémiai energiátárolók közé tartozik, a zárt anyagáramok miatt megoldható, hogy ideális esetben csak villamosenergia lépjen be és ki, így a tároló – amennyiben fekete dobozként kezeljük – az akkumulátorokhoz hasonló „pszeudo-akkumulátor” lenne. Két, különböző teljesítményű és kapacitású rendszer műszaki adataira adtunk becsléseket; az egyik le- és felszabályozásban vehetne részt (ekkor rövid tárolási idők lennének), míg a második egy szezonális tározó, amely a nyári PV-alapú túltermelést eltárolva télen hosszabb ideig képes lenne ellátni egy kisebb települést vagy intézményt. Bár jelenleg gazdaságilag még nem érné meg ilyen tárolókat építeni, a növekvő szükségletek hamarosan megtérülővé tehetik őket.

*

In this paper, a small-scale, modular, closed-system Power-to-Methane energy storage system has been described. Although the technology belongs to the class of chemical energy storage, due to the closedness of the system, in an ideal case, only electricity can enter and leave the system. Therefore, if treated as a black box, the storage would be a „pseudo-battery”, similar to real batteries. Technical specifications for two systems of different power and capacity have been estimated. The first could be used for positive and negative regulation (in which case there would be short storage times), while the second would be a seasonal storage facility that could provide electricity for a small community for a more extended period in Winter by storing the PV-based excess generation in Summer. Although presently it would not be economically viable to build such storage facilities, growing demand could soon make them profitable.

A Power-to-Methane (P2M vagy PtM) technológia a Power-to-Fuel, azaz a villamos energiát kémiai úton, valamilyen szintetikus üzemanyagban eltároló technológiák közé tartozik [1]. A P2M esetében az eltárolandó villamos energia segítségével metánt állítunk elő, ami később visszaalakítható villamos energiává, vagy üzemanyagként is felhasználható. Más technológiákkal – főként a Power-to-Hydrogen technológiával – összehasonlítva az egyszerű tárolás, szállítás és villamos energiává visszaalakítás szerepel a módszer fő előnyei között; az energiát „tároló” anyag, a metán a földgázzal együtt használható, ami a hazai adottságok mellett vitathatatlan előny. Mivel a metán nagyon csekély veszteséggel és nagyon nagy mennyiségben tárolható, így a P2M technológia különösen alkalmas lehet hosszú távú (pl. szezonális) és/vagy nagy tárolási kapacitást igénylő feladatok megoldására [2,3].

A szén-dioxid metánná alakítása történhet kémiai vagy biokémiai úton [1]; ez utóbbi esetben a technológia nemcsak tiszta szén-dioxid, hanem szén-dioxid/metán (pl. biogáz, depóniagáz) keverékek metántartalmának nagyfokú (100 %-hoz közeli) növelésére is alkalmas [4,5]. Ez a tulajdonsága minden Magyarországhoz hasonlóan fejlett mezőgazdasággal, illetve az ahhoz kapcsolódó, kiemelkedő biogáz-termelési potenciállal rendelkező országnál előnyt jelenthet más energiátárolási módszerekkel szemben [6].

A metán villamos energiává való visszaalakításánál keletkezik ugyan szén-dioxid, de a P2M technológiánál – amennyiben tiszta szén-dioxidból indulunk ki – ennek mennyisége megegyezik a betároláskor felhasznált szén-dioxid mennyiségével, azaz a technológia elvileg (pár százaléknyi, a tárolási veszteségekhez köthető kibocsájtástól eltekintve) karbon-mentes. A biogáz esetén szintén karbon-mentesnek számít a technológia, hisz a bemenőoldali metán biológiai eredetű, megújuló forrásokból származik. Viszont bármennyire is karbonmentes – jogilag – a technológia, a társadalmi elfogadottságát csökkentheti az, hogy visszaalakításakor szén-dioxid lép ki a rendszerből.

Ennek a problémának a megoldására megvizsgáltuk, hogy hogyan lehetne a technológiát zárttá tenni, azaz olyaná, hogy a tárolásra használt „fekete dobozba” csak villamos energia lép be és belőle csak villamos energia lép ki. Az ilyen rendszer arra is megoldást adna, hogy egyelőre – legalábbis amíg a szén-dioxid levegőből kivonása nem lesz ipari méretekben is elterjedt – nehéz nagyobb kapacitású metanizálókhoz megfelelő mennyiségű tiszta, megújulókból származó szén-dioxidot találni. A továbbiakban két ilyen berendezés – pszeudo-akkumulátor – tervét mutatjuk be; egy rövid tárolási idejű, kisebb kapacitású, és egy szezonális, nagyobb kapacitású megoldást [7].

A P2M-alapú pszeudo-akkumulátor részei

Jelenleg a Power-to-Methane technológia SNG (Synthetic Natural Gas vagy Substitute Natural Gas) gyártásra (majd annak tüzelőanyagként/üzemanyagként elégetésére), illetve rövidtávú energiátárolásra gazdaságilag nem alkalmas [7], bár egyes tanulmányok és előrejelzések a jövőben gazdaságilag is versenyképesnek predesztinálják a technológiát. Emellett a technológiának van olyan aspektusa, amellyel manapság is egyedi és mindenek előtt gazdaságilag is jövedelmező rendszerré válhat [8-13].

A tanulmányban két alkalmazási módszert mutatunk be. Az egyik fejlesztési irány egy olyan moduláris P2M üzem lenne, melynek fő feladata a hálózat szabályozása. A konténer méretű üzem (feketedoboz-szerű pszeudo-akkumulátor) le-és felszabályozásra is alkalmas, hiszen a villamos energia fogyasztására és termelésére is képes (ugyanúgy mint egy akkumulátor). Ebben az esetben a P2M bemenő és kimenő teljesítménye is magas lenne, a gyors „feltöltés” (leszabályozás) és áramtermelés (felszabályozás) végett.

A másik elképzelés szerint a moduláris P2M üzem szezonális energiatárolóként funkcionálna. Feladata az lenne, hogy egy egész éves adott teljesítményű PV park túlermelését eltárolja, majd egy kisebb település vagy ipartelep energiaszükségletét télen fedezze. Ebben a példában sokkal kisebb a bemenő és kimenő teljesítmény, hiszen egy töltési-kisütési ciklus jó közelítéssel egy évig is eltarthat. Mindkét elképzelés szerint a kezdeti szén-dioxid tartalmú gázt egy kisméretű biogáztelepről vételezi a rendszerünk, a villamos energiát pedig megújuló energiaforrásból (PV) kapja. Mivel a biogáztelepekről érkező biogáz nem vagy csak nehezen szállítható, így a P2M üzemek telepítése a biogáz forrásoknál lenne indokolt. Ezek a források gyakran elapadnak (nincs biogáztermelés), így semmiképpen sem lenne megtérülő egy komplett, nagy teljesítményű erőművet létesíteni. Erre nyújthat megoldást egy mobilis rendszer, egy 20 vagy 40 lábas áruszállító konténer méretű Power-to-Methane üzem. Amennyiben egy adott biogázüzem bezár (sok magyar példa) vagy más okból nem üzemeltethető, esetleg éppen nincs termelés, akkor akár közúti szállítással a rendszer gond nélkül mozgatható lenne egy olyan helyre, ahol rendelkezésre áll biogáz, illetve villamos energia.

A következő alfejezetben bemutatjuk a P2M rendszer egyes technológiai elemeit, kitérve azok előnyös, illetve hátrányos tulajdonságaira. Mindegyik berendezésnek létezik alternatívája, fontos döntési paraméter viszont a technológiában lévő potenciál. Hiába az egyik opció jelenleg 3%-kal jobb hatásfokot nyújt, ha a másik 10-15 éven belül már 5-10%-kal magasabb hatásfokot ér el. Mindkét koncepcióra teszünk technológiai javaslatokat, berendezés teljesítményekkel és anyagáramokkal egyaránt.

Elektrolizátor

A moduláris P2M rendszer egyik legfontosabb technológiai lépése maga az elektrolízis, amelynek inputja víz és villamos energia, termékei pedig a hidrogén- és az oxigéngáz. Az elektrolizáló cella fontos sok szempontból is; egyfelől befolyásolja a technológia összh hatásfokát; másfelől a P2M rendszer valószínűleg legdrágább egységét képezi, így a moduláris P2M piaci ára, illetve megtérülési ideje is javarészt az elektrolizátortól függ. A technológia nagyvolumenű elterjedését pedig a magas beruházási és üzemelési költség gátolhatja. Ebből adódóan ennek a tárolási módszernek a népszerűsége a technológia fejlettséggel (esetleges növekvő elektrolizátor hatásfokkal) és az alapanyagárral együtt fog változni.

Alapvetően manapság három különböző elektrolizátor típus használatos: az alkáli (továbbiakban AEL), a polimer elektrolit membrán (továbbiakban PEM) és a magashőmérsékletű elektrolizátor mind-mind más technológiai alapon nyugszanak [14]. Különböznek beruházási költségben, hatásfokban, technológiai fejlettségben, illetve üzemi paraméterekben. A moduláris Power-to-Methane esetében csak két elektrolizátort vizsgáltunk; az AEL és a PEM elektrolizátor típusokat [7, 14]. A típusok összehasonlítása az 1. táblázatban található.

Metanizáló

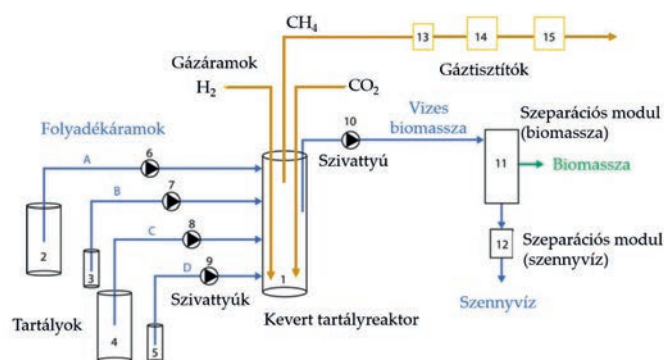
A metanizációnak létezik kémiai és biokémiai változata is; mivel az előbbihez gyakorlatilag egy komplett vegyi üzem kell, így az utóbbi alkalmasabb a kisméretű moduláris P2M berendezéshez [7], így csak ezt a technológiát mutatjuk be.

A biológiai metanizáció alapja – akár csak a kémiai metanizációé – a hidrogén és szén-dioxid metánná történő konverziója, de ez esetben a „katalizátor” az Archaea mikroorganizmus, amely az egyik legidősebb formáció a Földünkön. Ezek a törzsek képesek

1. táblázat. Az AEL és a PEM elektrolizátorok összehasonlítása [7, 14]

	AEL	PEM
Elektrolit	KOH _(l)	membrán (szilárd)
Működési hőmérséklet [°C]	40-90	20-100
Működési nyomás [bar]	1-30	30-50
Töltéshordozó	OH-	H+
Hatásfok [%]	62-82	67-82
Hidrogén termelés [m ³ /h]	1-760	0,01-30
Bemenő teljesítmény [kW]	5-3400	0,5-160
1 m ³ H ₂ előállításához szükséges energia [kWh]	4,5-7,0	4,5-7,5
Beruházási költség [€/kW]	800-1500	2000-6000
Előnyök	<ul style="list-style-type: none"> gazdaságos üzemelés nagy üzemi tapasztalat bizonyított technológia 	<ul style="list-style-type: none"> egyszerű kialakítás és működés mivel nincs elektrolit a cellákban a rozsdamentes acél katalizátor miatt nem jellemző túlfeszültség kialakulása
Hátrányok	<ul style="list-style-type: none"> komplex gáztisztítás termékoldalon dinamikus üzemvitelre nem igazán alkalmas 	<ul style="list-style-type: none"> jelenleg drágább technológia: költséges anyaghasználat

magukban a szén-dioxidot és hidrogént metánná alakítani, úgy, hogy közben a szén-dioxid széntartalmának csak elenyésző részét használják saját sejteik építésére. A biológiai reakció egy bonyolult, enzimek által katalizált láncreakció [15], ezt itt nem részletezzük.



1. ábra. Egy biometanizáló elvi kapcsolási rajza [14]

A biológiai metanizáló általában egy kevert tartályreaktorból áll, amelyhez számos segédrendszer csatlakozik (1. ábra). A reaktor inputjai között szerepel természetesen a szén-dioxid és a hidrogén, amelyeket a vizes közegű, az Archaea törzseket tartalmazó oldaton keresztül buborékoltatnak át. A reakció folyadékfázisban játszódik le homogén reakcióként, ám a keletkező metán újra kipezseg az oldatból és a reaktor felső részében gyűlik össze, ahonnan folyamatosan elvezetik [16]. A reaktor többi bemeneti csomópontja az Archaea

törzsek és az egyéb tápanyagok (nitrogén, foszfor, kén) folyamatos pótlását biztosítja. Fontos megjegyezni, hogy a reakció lejátszódása során víz is képződik. Ennek elvezetése kulcsfontosságú, hiszen higítja a reakcióelegyet, amely hatásfokcsökkenést (konverziócsökkenést) okoz. Amennyiben a betáplálás és a reakcióhoz nem szükséges anyagok elvétele megfelelően működik, egy egyensúly alakul ki, ahol a termékösszetétel és a konverzió is változatlan marad. A termofil mikroorganizmus törzsek 45-70°C között igazán aktívak. Az optimális pH 7-nél, de kutatások bizonyították, hogy 5-8 között sem változik érdemben a törzsek általi metánkonverzió [17]. A biológiai metanizáció nagy előnye, hogy a kémiaival ellentétben nem érzékeny a bemeneti gázkeverék szennyezőire, ezért például tisztítatlan biogáz is alapanyaga lehet a technológiának [18, 19]. Laboratóriumi kísérletek bizonyítják, hogy az alternáló betáplálások és a betáplálási üresjáratok egyáltalán nem befolyásolják a törzsek működését, ezért egy ingadozó termelőhöz (megújuló) könnyen kapcsolható.

A reaktor fontos eleme a metánelvezető csanak, ahol a produktum gáz távozik. Opcionálisan a technológiai sorba kapcsolható gáztisztító berendezés, ahol az esetleges szennyezők (víz és kén) eltávolíthatók, ezzel a metán közvetlenül a gázhálózatba vezethető. A reaktorban kevert folyadékot szivattyúkkal távolítják el, ennek magas a szárazanyagtartalma. Szeparációs modulokkal (1. ábra 11-12 jelzései) a szilárd anyag elválasztható a víztől, amely további tisztítások után felhasználható. A szilárd anyag biomassza formájában hasznosítható. A biológiai metanizáció számos előnnyel rendelkezik a kémiai metanizációval szemben, de természetesen ez fordítva is igaz. A 2. táblázat szemlélteti összefoglalva ezeket az előnyöket és hátrányokat.

2. táblázat. A biometanizáció előnyei és hátrányai a kémiai módszerrel összehasonlítva [7]

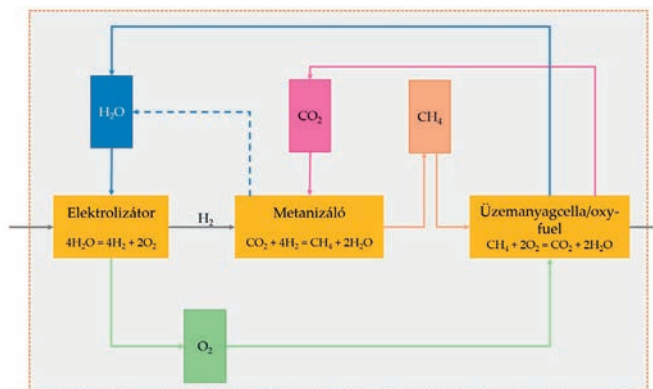
Előnyök	Hátrányok
<ul style="list-style-type: none"> Metántartalom a termékben akár 98%-os is lehet (egy lépésben) Közönséges reakció körülmények: 40-60 °C és 1-3 bar Nem érzékeny a betáplálási gázkeverék szennyezőire Gyors és flexibilis működés – ingadozó betáplálás mellett is kiválóan működik Kisebb telepek (kW-os tartományban) esetén praktikus és kivitelezhető 	<ul style="list-style-type: none"> Az oldószer víz újrahasznosítása, kezelése szükséges CO₂ és H₂ gázok nehezen oldódnak a vizes közegű oldószerben A technológia felskálázása még nem teljesen megoldott

Gáztárolók

A folyamat zárttá tételéhez szükséges, hogy az anyagokat – nemcsak a metánt, de a folyamatban szereplő többi anyagot is – tároljuk. Ezek az anyagok a metán (mint végtermék), a szén-dioxid (mint kiinduló anyag), az oxigén (a későbbiekben ismertetjük, hogy a metán visszaalakításához az elektrolízisből nyert oxigént használnánk, nem a levegő oxigénjét), valamint a víz és a hidrogén. A két utóbbi tárolásával nem foglalkozunk; a hidrogén szinte azonnal metánná fog alakulni, így tárolása nem lesz szükséges, a víz esetén pedig kivonása és újra tisztítása valószínűleg nem érné meg, mivel kívülről gond nélkül pótolható; emellett a hosszú távú tárolása olyan technológiai és pénzügyi kihívásokat jelentene, ami a teljes berendezés árát jelentősen megnövelné, de elvi szinten ezek tárolása/tárolhatósága is szóba kerül.

A metán oxigénben való visszaalakítására azért lesz szükség, mert így „füstgázként” vízgőzt és tiszta szén-dioxidot kapunk; ez utóbbi pedig felhasználható a folyamat elejére visszavivé, így a pszeudo-akkumulátor zárttá tehető, nincs szükség a szén-dioxid pótlására. Az oxigénes visszaalakítási technológiák másik előnye, hogy nem keletkeznek nitrogén-oxidok, azaz környezetvédelmi szempontból is jobbak.

A 2. ábra egy moduláris P2M üzem egységeit és a közöttük lévő anyagáramokat mutatja be.



2. ábra. Egy moduláris P2M üzem egységei és a közöttük lévő anyagáramok

Oxigén tárolás

A P2M rendszer oxigénigénye alapvetően a technológia sor végén található, ahol a metán átalakítása történik villamos energiává. Ez történhet metános üzemanyagcella, gázmotor vagy gázturbina segítségével. Mivel nem akarjuk, hogy a rendszerbe nagy mennyiségű nitrogén kerüljön, így a visszaalakításkor nem használhatunk levegőt, hisz annak nitrogén-tartalma közelíti a 80%-ot. Így a visszaalakításnak oxigénnel kell történnie; gázturbina vagy gázmotor esetében az ilyen technológiákat oxy-fuel néven ismerik. Mivel a tiszta oxigénben az égés túl intenzív lenne, ezért szén-dioxidot szoktak hozzá keverni; szerencsére ez rendelkezésre fog állni.

Ez alapján az oxigéngáz tárolása abban az esetben fontos, amikor az elektrolízátorban keletkező O₂-t fel szeretnénk használni a metán visszaalakításánál. Ekkor a tároló előtt egy vízmentesítő kell a rendszerbe iktatni, hogy az elektrolízátorból jövő gáz cseppmentes legyen. Ezután kerülhet az oxigén a megfelelő tartályba. Az oxigéntartályok üzemi nyomása 140-200 bar, a palack vagy tartály mérete teljesen igényre szabható.

Amennyiben az elektrolízis során keletkezett oxigént nem szeretnénk eltárolni és felhasználni, akkor az oxigént más forrásból kell beszerezni. Erre a legkiszámoltabb lehetőség az, hogy az oxigént palackban vásároljuk és implementáljuk a P2M üzembe. Ennek hátránya a folytonos utánpótlás, amely csökkenti a rendszer önállóságát, függetlenségét.

Az oxigén üzemben belüli felhasználása a kompresszió és a cseppmentesítés villamosenergia-igénye miatt csökkenti a technológia összehatófokát. Ennek a tárolórendszernek a beilleszthetősége így további vizsgálatokat igényel.

Szén-dioxid

A szén-dioxid tárolás szerepe kritikus a P2M üzem szempontjából. A technológiai sorban a metanizálónál szükséges a szén-dioxid, másfelől a metán visszaalakításánál képződik CO₂, így annak elrak-

tározása is megoldott lenne egy esetleges szén-dioxid puffer-tároló-tartállyal. Egy ilyen tároló akkor is hasznos lenne, ha külső, ingadozó tömegáramú szén-dioxid-forrásról működne a metanizáló; ekkor pufferként lehetne felhasználni. A nagyvolumenű tárolás költséges, hiszen a cseppfolyós szén-dioxid tárolása általában 16-20 baron és -24 °C -on történik [20].

A STORE&GO projekt részeként három különböző Power-to-Methane rendszer üzemel különböző méretekben, egyik sem tartalmaz szén-dioxid tartályokat. A falkenhageni 1 MW-os egység egy biogáz/bioetanol üzemből nyeri a szén-dioxidot, a svájci solothurni telephely egy szennyvíztisztítóból. Az olasz 200 kW-os üzem pedig közvetlenül a levegőből választja le a szükséges szén-dioxidot [21].

A moduláris P2M üzem esetében a jelen árak mellett gazdaságilag nem lenne kivetelezhető egy cseppfolyós CO_2 tárolót kivitelezni, kizárólag csak abban az esetben, ha szén-dioxid kvótát lehetne igényelni a ki nem bocsátott gáz mennyisége után, esetleg kedvezménytel lehetne élni hasonlóan a kvótához.

Metán

A biometán tárolása nem különbözik a fosszilis eredetű metán tárolásától. Alapvetően két technikát alkalmaznak; a gáz tárolása történhet nagy nyomáson, nyomástartó tartályokban, akár szobahőmérsékleten, de tárolható cseppfolyós állapotban is (kriogenikus folyadékként), nagyon alacsony hőmérsékleten (-163 °C), atmoszférikus nyomáson.

A szobahőmérsékletű, gáz állapotú, atmoszférikus nyomású metán térfogatra vetített energiatartalma nagyon kevés. Mindkét tárolási módszer ezt az energiasűrűséget igyekszik növelni. A megnövelt nyomás (~200 bar) következtében a térfogat drasztikusan lecsökken, így a tároláshoz szükséges helyigény is nagyban csökkenhet, amely a mobil P2M üzem esetében óriási előnyt jelenthet. Ebben az esetben a környezet hőmérséklettel nem igazán kell törődni, a technológia -40 és 30 °C között működőképes, a nyomás állandó értéken tartható gyakorlatilag veszteségmentesen. Fontos kritériuma a tárolt gáznak a megfelelő tisztaság, hiszen nagy nyomáson a kén-hidrogén szennyezők és víznyomok erőteljesen korrozívak, így ezek megkötése feltétlenül szükséges a betárolás előtt. A nyomásálló tartályok legtöbbször valamilyen acél kompozitból készülnek, az ötvözőanyag legtöbbször mangán, gyakran azonban műanyag kompozitokat használnak erre a célra, amelyek szélerősítéssel állnak ellen a bennük uralkodó nyomásnak. Energetikai szempontból a technológia egyetlen nagy erőforrást igénylő lépése a gáz nyomás alá helyezése. 1 m^3 metán 138 bar-ra történő kompresszáálásához hozzávetőlegesen $0,5\text{ kWh}$ energia szükséges [22]. Ennek fedezése két forrásból is lehetséges. Az egyik esetben a technológián kívüli villamoshálózatról vételezzük energiát, a másik esetben a technológián belüli hulladékhőből nyert villamosenergiával fedezzük a szükségletet.

Habár a kriogenikus tárolás is egy bevett módszer a metán tárolására (LNG), ennek költségei jelentősen magasabbak a CNG tárolásánál, így a moduláris, kisméretű Power-to-Methane üzemben nem tartjuk alternatív opciónak a gazdasági korlátok miatt.

Energia visszatérő berendezések (Methane-to-Power)

Az általunk vázolt moduláris P2M berendezés energiatároló funkcióját csak akkor láthatja el, amennyiben rendelkezik egy energia visszatérő résszel is. Jelen munkában két lehetőséget vizsgálunk. Az egyik megvalósítás szerint a konténer egy oxy-fuel gázturbinát tartalmazna, amelyben a biometán égéséből származó hő haszno-

sulna. Alternatív megoldásként üzemanyagcella is alkalmazható lenne, mely számos előnnyel – természetesen hátránnyal is – rendelkezik egy gázturbinával szemben. A gázmotoros megoldást – alacsonyabb hatásfoka miatt – egyelőre nem vizsgáltuk.

A következőkben többféle megközelítés szerint is összehasonlítjuk a két energiaátalakítási technológiát, ügyelve a megvalósíthatósági határookra.

Oxy-fuel gázturbina

Az oxy-fuel energiaátalakítási technológia nagyban hasonlít a közönséges kazános égetéshez, a nagy különbség abban rejlik, hogy ennél a módszerrel az oxidálószer nem levegő, hanem tiszta oxigén. Ezáltal a technológia számos előnnyel rendelkezik: egyfelől – mivel az oxidáló ágens nem tartalmaz nitrogént – a termék gázkeverékben nem lesznek nitrogén-oxidok, amelyek erőteljes üvegházhatással rendelkeznek. A füstgáz javarészt csak vízből és szén-dioxidból áll. Ennek jelentős hozadéka, hogy a szén-dioxid egy egyszerű kondenzátorral elválasztható a víztől, kompresszáható, majd a későbbiekben tárolható, ezzel elérhetővé válik a fosszilis alapú energiatermelés zéró kibocsátással [23].

A technológiai ötlet Abraham és munkatársai körében fogant meg, amikor azt javasolták, hogy a fokozott kőolajkinyerés számára szükséges szén-dioxidot oxy-fuel kazánokkal állítsák elő [24]. Az első kivétel egy 3 MW-os pilot projekt keretein belül valósult meg az Észak Dakotai Egyetemen [25]. Oxy-fuel kemencékre alapuló erőművek ma is szép számmal épülnek az üveg-, alumínium- és cementgyárak közelében [26]. Ennek fő oka, hogy a technológia magasabb hatásfokon, alacsonyabb üzemanyagszükséglettel, kisebb nitrogén-oxid kibocsátással működik [27].

A technológiát alapvetően a széntüzelésű erőművek versenytársaként alkották meg, és mind a mai napig az oxy-fuel üzemek általános alapanyaga a kőszén, mint energiahordozó. Energiaegységre vetítve messze a széntüzelésű erőművek üvegházhatású gázkibocsátása a legnagyobb. Annak ellenére, hogy alapvetően a széntüzelésre épült a technológia, természetesen más típusú energiahordozók is szóba jöhetnek. A Power-to-Methane üzem tárolt energiája metán formájában van jelen, így ezt egy oxy-fuel gázturbinával kívánjuk újra villamos energiává alakítani.

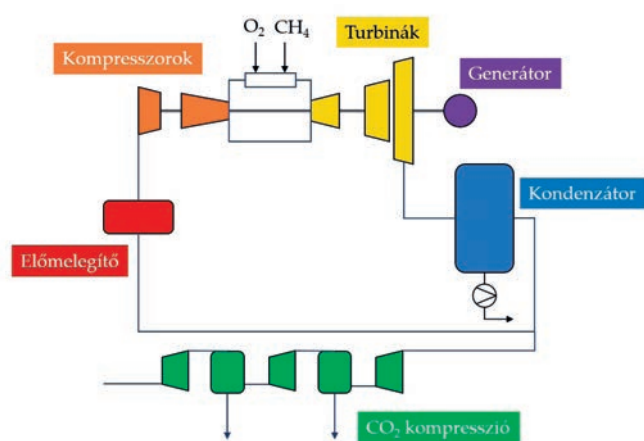
Koncepciót készült skandináv kutatók által egy oxy-fuel gázturbina és egy gőzturbina kombinálásával [28]. A gázturbina Brayton-ciklusában keletkezett forró füstgáz energiatartalmát egy Rankine-ciklusban hasznosították gőzturbina segítségével. A technológia összetettsége miatt, az esetünkben csak a gázturbina felépítésével, működésével foglalkozunk.

Egy konvencionális oxy-fuel ciklusban az oxigént levegőből nyerik ki cseppfolyósítás, membrán elválasztás vagy adszorpció útján [28]. Bármelyik opcióra eshet a választás, mindenképpen nagyon energiaintenzív maga a folyamat, ez a technológia összhatósfokát és gazdasági megtérülését ronthatja. Szerencsére a P2M üzem esetében már rendelkezésre áll tiszta oxigén, hiszen az elektrolízis során képződik, amelyt követően eltárolható. Mivel a P2M üzemen „belül” a kémiai reakciók sztöchiometriailag ekvivalensek (egy mól metán képződésekor 2 mól oxigén keletkezik; egy mól metán égetésekor 2 mól oxigénre van szükség), így külső oxigén pótlásra csak elvétve lehet szükség (minimális szivárgás, veszteség esetén).

A turbinák utáni kondenzátor arra szolgál, hogy a füstgázt (javarészt vízgőz, szén-dioxid) alkotóira bontsa. A hűtött kondenzátorban a víz cseppfolyós állapotba kerül, a szén-dioxid továbbra is

gázfázisban marad. A kondenzvíz visszavezethető a technológia sor elejére, az elektrolizátorba, a szén-dioxid pedig többlépcsős kompresszió után eltárolható. A keletkezett szén-dioxid egy része azonban egy előmelegítőn keresztül újra a gázturbinába kerülhet, ezzel fenntartva a ciklikusságot. Jelentős energiaigénnyel a gázturbiná előtti, illetve a kondenzátor utáni kompresszorok rendelkeznek, amelyek ezáltal ronthatják a kör hatásfokát. A 3. ábrán egy oxy-fuel gázturbiná és követőberendezései sematikus felépítése látható.

Az oxy-fuel gázturbiná használata a P2M üzembn óriási előnnyel bír, hiszen mindkét input anyag (O_2 , CH_4) rendelkezésre áll, illetve mindkét output termék (H_2O , CO_2) újrafelhasználható a technológián belül. Ez azt is jelenti, hogy megvalósítható egy olyan koncepció is, amelynek nemcsak bruttó, hanem nettó szén-dioxid kibocsátása is nulla.



3. ábra. Az oxy-fuel gázturbiná és követőberendezései sematikus felépítése

Üzemanyagcellák

A hidrogén-alapú üzemanyagcellák (fuel cells) működése nagy vonalakban fordítottja a P2M üzembn szintén megtalálható elektrolizátorénak. A vízbontás folyamatánál villamos energiát kell bekeletetni egy endoterm bruttó reakció lezajlásához, amikor is termékként oxigén- és hidrogéngáz keletkezik. Az üzemanyagcellák esetében pont a kiindulási anyagunk a hidrogén és az oxigén, termékként pedig vizet és villamos energiát nyerünk.

Az első üzemanyagcellák már közel 180 éve megjelentek, de ipari alkalmazásuk alig pár évtizede kezdődött. Ennek oka a folyamatosan csökkenő fajlagos költségük és az egyre növekvő igény a „tisztá” energiatermelésre [29]. Számos üzemanyagcella típust különböztetünk meg kialakítás, alapanyag, elektrolit és üzemi körülmények alapján. Közös tulajdonságuk az, hogy az anódtérben és katódtérben rendre ugyanazok a reakciók játszódnak le (hidrogén oxidáció, oxigén redukció). A P2M üzembn csak olyan üzemanyagcella jöhet szóba, amely inputként metánt tud befogadni. A metán közvetlenül nem tud részt venni az elektrokémiai reakcióban, a szerepe a hidrogén biztosítása lesz (azaz kémiai hidrogéntárolóként szerepel). Ehhez a metánt az elektród tér előtt szükséges átalakítani, erre pedig jelenleg csak a magashőmérsékletű üzemanyagcellák képesek, ahol is olyan magas az üzemi hőmérséklet, hogy a metán reformálása megtörténik. Ebben a fejezetben két potenciális jelöltet mutatunk be: a karbonát-olvadék (MCFC = molten carbonate fuel cell) és a szilárd oxid (SOFC = solid oxide fuel cell) üzemanyagcellát.

Ahogy arról már szó esett, mindkét technológia képes metán befogadására, hiszen még az elektródterek előtt megtörténik a reformálás a magas hőmérsékletnek köszönhetően.

A két technológia alapvetően már az elektródokban és az elektrolit minőségében is különbözik. Lényegi eltérés, hogy ameddig az SOFC-nél a töltéshordozó maga az oxid-ion, addig az MCFC-nél a karbonát-ion az, ami átdiffundál az elektroliton. Emiatt a katódtérbe az oxigén mellett szén-dioxidot is táplálni kell, hiszen belőle alakul ki a negatív töltésű karbonát-ion. Az anódtérben keletkezett szén-dioxid rögtön visszavezethető a katódtérbe sőt, a reformálásnál képződött CO_2 is alkalmas erre. Az SOFC-nél az oxid-ion a kerámia elektroliton átdiffundálva kerül az anódtérbe, ahol a hidrogénnel víz-zé egyesülnek, ebben az esetben nincs „melléktermék”.

Jelentős eltérés mutatkozik a működési hőmérsékletek között is. Az MCFC alacsonyabb hőmérsékleten kíván meg (600-700 °C), míg az SOFC 800-1100 °C-on üzemel [30]. Magas hőmérsékletüknek köszönhetően nincs szükség előzetes metán reformálásra, így a P2M által termelt metán gond nélkül visszaalakítható.

A magas hőmérséklet azonban hátránnyal is jár, a hulladék hő nagyon jelentős. Emiatt mindenképp érdemes valamilyen hulladék hőhasznosítási technológiát alkalmazni. Egy villamos energia termelésre alkalmas ORC beépíthető lenne, de az is megoldás lehet, ha nem villamos energiává alakítjuk a hőt, hanem valamelyik „melegenergia” igényes folyamatban hasznosítjuk (pl. metanizáló). Amennyiben a P2M üzembn közelében kis melegvíz igényű fogyasztó található, annak kielégítésére is fordítható a hőforrás.

Az MCFC technológiát általában stacionárius áramtermelésre alkalmazzák. Az üzemanyagcellából kilépő magas hőmérsékletű füstgáz hasznosítható egy gázturbinában, így a rendszer összhatásfoka tovább növelhető. Ilyenkor a turbináról sok szén-dioxid származik, amely alapanyaga lehet az üzemanyagcellának, így a kapcsolt berendezés hatásfoka növelhető [31].

A szilárd-oxidos üzemanyagcella felhasználási területe szélesebb. 20 és 500W között katonai célokra, 100-250 kW között stacionárius áramtermelésre, megawattos tartományban pedig kombinált ciklusban alkalmazzák. Létezik olyan változat is, amely kW-os tartományban képes működni ezzel kisebb háztartások villamos energia igényét látva el, a hulladék hőt hasznosítva pedig melegvíz előállítására is alkalmas [32,33].

A fentebb említett két tüzelőanyagcella hatásfoka 50% körül van, ennek növelése a kogeneráció, vagyis a mechanikai és hő-

3. táblázat. A jelenleg kapható üzemanyagcellák összehasonlítása (*MTG = mikro gázturbiná **DUHW = direkt forróvíz hasznosítás)[29]

Üzemanyagcella	Gyártó	Kogeneráció típusa	Hatásfok kogeneráció nélkül [%]	Hatásfok kogenerációval [%]
MCFC	FuelCell Energy	MTG*	40	60
MCFC	FuelCell Energy	DUHW**	42	80
MCFC	CFC Solutions	DUHW	50	70
MCFC	Ansaldo Fuel Cells	MTG	45-55	75
SOFC	Solidia	MTG	50-55	60-75
SOFC	Kyocera	DUHW	45	75
SOFC	Siemens Westinghouse	MTG	52	65

energia együttes hasznosítása révén érhető el. Ennek segítségével akár a 60-80% hatásfoktartomány is elérhető [34]. Nagyobb üzemanyagcella gyártók általában mikro gázturbinával hasznosítják a cellákból kilépő forró gázelegyet. A 3. táblázatban Guaitolini és társai foglalták össze a nagyobb gyártók üzemanyagcella típusait, illetve az azokhoz tartozó kogenerációs megoldást.

Az üzemanyagcellák valós alternatívát jelentenek a villamosenergia-termelésben, a magas hatásfokuk, illetve az akár zero károsanyag kibocsátásuk miatt. Hátrányuk, hogy rendkívül komplex a működésük, előállításuk, emiatt az árak is nagyon magasak. Azonban a jövő energiatermelése minden bizonnyal erre a technológiára fog épülni legyen az alapanyag metán, vagy akár hidrogén. A karbonsemleges klímacélok elérése végett mindenképpen számolnunk kell az üzemanyagcellák elterjedésével.

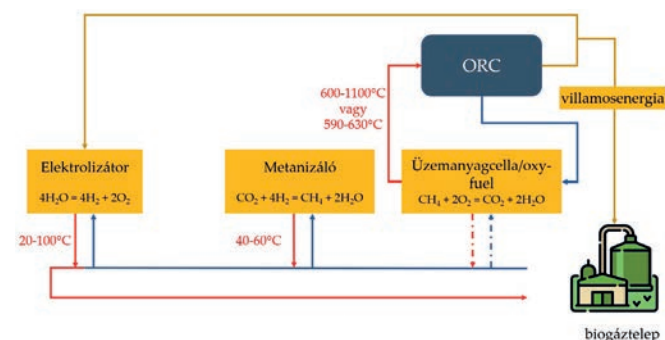
Hulladékhő-hasznosító

A teljes P2M2P (Power-to-Methane-to-Power) ciklus bruttó hatásfoka a jelenleg elérhető technológiával 33%, amely a jövőben nagy eséllyel növelhető lesz akár 50%-ig [2,3,7]. Ennek egyik kulcsfontosságú lépése, hogy a technológiák által fejlődő hulladékhőt valamilyen formában hasznosítsuk. Ez nem csak a hatásfokot fogja nagymértékben emelni, hanem a beruházás megtérülésének sebességét is. Mivel a P2M üzemben gyakorlatilag mindegyik rész-folyamat magasabb hőmérséleten játszódik le a szobahőmérsékletnél, így praktikus mindegyik technológiai egységből elvonható lenne az általuk termelt, fel nem használt hulladékhő.

4. táblázat. A résztechnológiák hőmérsékleteit összefoglaló táblázat

Berendezés		Üzemi hőmérséklet [°C]
Elektrolizátor	AEL	40-90
	PEM	20-100
Metanizáló	kémiai	200-600
	biológiai	40-60
Oxy-fuel gázturbina		590-630
Üzemanyagcella	MCFC	600-700
	SOFC	800-1100

A 4. táblázat feltünteti az egyes technológiai részek üzemi hőmérsékleteit. Ez alapján megjegyezhető, hogy jelentős hőmennyiség szabadul fel a metán villamos energiává való visszaalakításakor (amennyiben biológiai metanizációt választunk). A metanizáló (biológiai) és az elektrolizátor esetében az alacsony üzemi hőmérséklet miatt csak lokális fűtési igény fedezésére van lehetőség. Amennyiben a moduláris P2M üzem közelében vannak megfele-



4. ábra. A P2M üzemben keletkezett hulladékhő felhasználási lehetőségei

ő létesítmények, akkor az üzem az épületek (öltözők, irodák stb.) melegvíz igényét vagy igényének egy részét is elláthatja. Alacsony hőmérsékletű ORC-vel akár villamos energia is előállítható lenne, amely a technológia energiaigényének egy kis részét fedezné. Azonban ennek, komplexitása miatt csak akkor lenne praktikus érteleme, ha semmilyen formában nem állna rendelkezésre valamilyen melegvíz fogyasztó.

Az üzemanyagcella vagy éppen az oxy-fuel gázturbina esetében azonban a keletkező füstgáz hőmérséklete igen magas (4. táblázat). Ennek hőtartalma már villamosenergia-termelésre is igen alkalmas [35]. Az 4. ábra alapján látható, hogy egy szerves Rankine-ciklussal (ORC) működő turbina akár közvetlenül a biogáztelepet láthatja el villamos energiával, vagy éppen az energiaigényes elektrolizátort. Mindkét felhasználási terület nagyban javítja a telep hatásfokát.

A P2M-alapú pszeudo-akkumulátor koncepciók

Az előző fejezetekben tárgyalt technológiák közül műszakilag mindegyik alkalmas lehet a moduláris P2M üzembe való integrációra. Az adott technológiai elem kiválasztásában számos döntési változó játszhat szerepet. Ilyen paraméter a gazdasági megvalósíthatóság (pontosabban a gazdasági megtérülés), az egyes technológiák fejlettségi szintje, illetve a lokális rendelkezésre állás. Ebben a munkában alapvetően biológiai metanizálással ellátott P2M üzemek koncepcióit vázoljuk, az elektrolizátor és a metánt visszaalakító berendezés típusát nem rögzítve. Magyarországon jelenleg a biometanizáció a támogatottabb metánfejlesztési eljárás, a magyar kutatások mindegyike erre a technológiára koncentrál, többek között a Power-to-Gas Hungary Kft. is. [36].

A következő két alfejezetben két eltérő koncepciót vázolunk fel, amelyek csak az egyes technológiák teljesítményében, illetve kapacitásában különböznek. Az első egy leszállító funkciót betöltő P2M üzem lesz, melynek fő feladata a megújulókkal által termelt többlet villamos energia „elfogyasztása”. Ez esetben a betárolt villamos energia rövid időn belül kinyerésre kerül. Az ilyen esetekben a Power-to-Hydrogen (P2H) módszer jobb lehet, mert a teljes tárolási hatásfoka jobb (nincs meg a metán oda-vissza alakításakor fellépő veszteség), de olyan esetekben, ahol a hidrogén villamos energiává való visszaállítása nem lehetséges (pl. nincs elég a nagyteljesítményű üzemanyagcella), a P2M-alapú megoldás is életképes lehet.

A második koncepció egy szezonális energiátároló funkciót tölt be, amely egy kisebb település vagy ipartelep energiaszükségletét tudja fedezni szigetüzemben. Mindkét esetben a teljes rendszer egy „20 lábás” kereskedelmi konténerben (6,058m×2,591m×2,438m) szeretnénk elhelyezni. Ennek nagyobb testvére a „40 lábás” kialakítás, amely hosszúságában pont kétszer akkora. A

5. táblázat. A felvázolandó koncepciók műszaki tartalma

Technológiai egység		Moduláris Power-to-Methane üzem
Elektrolizátor		PEM vagy AEL
Metanizáló		biológiai
Metán visszaalakítás		Oxy-fuel gázturbina vagy MCFC/SOFC
Tárolók	Metán	✓
	Hidrogén	✗
	Szén-dioxid	✓
	Víz	✓
	Oxigén	✓

nagyobb kivétel is releváns lehet a moduláris P2M üzem számára, amennyiben az általunk javasolt teljesítményeken és kapacitásokon túl felülméretezünk.

A vizsgált esetekben az előbb ismertetett gáztározók mellé még víztárolót is tervezünk; ennek költségvonzata kicsi. Előnye lehet, hogy a kívülről vételezett vizes módszerrel ellentétben nem kell állandóan sótalanítani-tisztítani.

A tervezett egységek műszaki tartalma az 5. táblázatban található.

Le- és felszabályozást végző pseudo-akkumulátor

A megújuló energiaforrások robbanásszerű növekedésével szimultán, a villamoshálózat terheltsége is fokozatosan nő. Ennek következménye az egyre gyakoribb áramszolgáltatási problémák [37]. Magyarországon jelentős mértékű leszabályozás szükséges, tehát a többlet fotovoltikus áram elfogyasztása mindenképp egy megoldani kívánt probléma [38]. Ennek egy része elektrokémiai tárolással megoldható lenne, viszont egy ilyen kapacitású akkumulátortelepnek óriási költségvonzatai lennének. A bruttó szabályozási igény az országban pozitív, tehát többlet leszabályozásra van szükség. Ennek egy megoldási lehetősége lenne a P2M üzemek alkalmazása, amelyek metánt fejlesztenének a többlet villamos energiából, illetve a biogáztelepeken előállított biogázból. A megtermelt, nagy tisztaságú metán ezután a földgázhálózatba táplálható vagy akár a P2M üzemben belül tárolható és szükség esetén (felszabályozás) villamos energiává alakítható.

A leszabályozást végző P2M üzem feladata, hogy közepes sebességű metántermelés mellett, gyorsan tudjon villamosenergiát szolgáltatni, egy nagyteljesítményű oxy-fuel gázturbina vagy akár egy üzemanyagcella segítségével. Ez a nagyteljesítményű tüzelőberendezés rövid idő alatt nagy teljesítményre lenne képes (névleges teljesítmény 200-500 kW). A leszabályzó P2M üzem koncepciójának tervezett méreteit a 6. táblázat foglalja össze.

6. táblázat. Le- és felszabályozásra alkalmas moduláris P2M üzem adatai

Technológiai egység		Teljesítmény/térfogat
Elektrolizátor		80 kW (input); 15 Nm ³ H ₂ /h (output)
Metanizáló		3,75 Nm ³ CH ₄ /h (output)
Metán visszaalakítás		200 kW oxy-fuel gázturbina
Tárolók	Metán	1,3 m ³
	Hidrogén	-
	Szén-dioxid	1 m ³
	Víz	1 m ³
	Oxigén	1 m ³

Amint a táblázatban is látható, a technológiai sor elején egy 80 kW bementi teljesítményű elektrolizátor áll [39], a Hydrogenics vállalat HySTAT-15-10 típusú elektrolizátort alapul véve. A kilépő hidrogén térfogatárama 15 Nm³ H₂/h, amely közvetlenül a metanizálóba lép be. A metanizálóból negyed ekkora térfogatáramú metán lép ki (sztöchiometriai egyenlet), vagyis 3,75 Nm³/h. Amennyiben feltételezzük, hogy a P2M metán tárolóját 72 működési óra alatt szeretnénk feltölteni, akkor egy 1,3 m³-es CNG tárolóra van szükségünk [40], amely 200 bar nyomás alatt tartja a gázt. Ez összesen 2,7 MWh energiát jelent metán formájában. Feltételezzük 40%-os átalakítási hatásfokot az oxy-fuel gázturbina esetében, így a vissza-

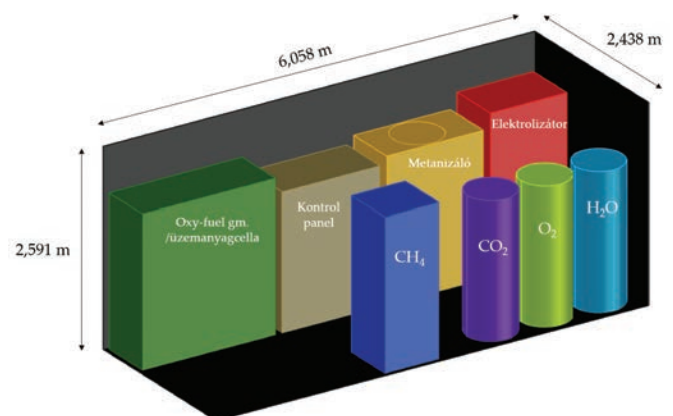
nyerhető energia nagyjából 1 MWh. Ehhez az energiaértékhez egy 200 kW-os gázturbinát választva, a rendszer 5 óra alatt képes leadni a teljes mennyiséget, így a felszabályozás könnyen megoldható. Amennyiben inkább a leszabályozásra való törekvés nagyobb, érdemesebb nagyobb elektrolizátort és metanizálót választani (akár 200-300 kW-ig), kisebb gázturbinával és nagyobb metán tárolóval.

Amennyiben szeretnénk növeni a technológiai egységek teljesítményét, megoldható, hogy az egyes tárolók (tartályok) a konténeren kívül kerüljenek elhelyezésre. A metán tárolására is létezik alternatíva. Ilyenkor a megtermelt metánt a földgázhálózatba táplálja a rendszer, amikor pedig villamos energiára van szükség onnan vételez. Ezzel helyet lehet megtakarítani az elektrolizátornak, a metanizálóknak és a gázturbinának/üzemanyagcellának.

A jövőben egyre több teljesítménykiegénylítő berendezés lesz szükséges velejárója a megújuló energiaforrásoknak [41], hiszen ezek nagyvolumenű termelése óriási ingadozásokat fog okozni a termelési oldalon. Így a decentralizált moduláris Power-to-Methane üzem a jövőben jelentős szerepet tölthet be a hálózatszabályozásban.

Szezonális P2M pseudo-akkumulátor

A második vázolt moduláris P2M üzem koncepció inkább a szezonális energiatárolást képviseli, mint sem a hálózatszabályozást. Ebben az esetben feltételezzük azt, hogy a környéken egy kis település vagy létesítmény éjszakai és/vagy téli fogyasztását látja el villamos energiával. A konténeren belül ez esetben egy sokkal kisebb teljesítményű elektrolizátorral, metanizálóval és gázturbinával számolhatunk. Mivel a koncepció szerint a nyári többlet villamosenergia-termelést kellene eltárolni (kizárólag PV), így a metán tartály jóval nagyobbra van szükségeltetik, mint a szabályozó P2M esetében. Az elektrolizátort 15 kW bemenő teljesítményűnek választva, évi 5 hónappal (május-szeptember), napi 5 óra működéssel számolva a megtermelt metán mennyisége 525 Nm³, amely 2,5 m³ CNG-nek felel meg. Ez 5,25 MWh-nyi energiának felel meg, amelyből 2,1 MWh nyerhető vissza, amennyiben 40%-os átalakítási hatásfokkal számolunk. A metán tárolási kapacitása még tovább növelhető, akár 5-6 m³-ig is (5 m³ CNG esetén a tárolt energia több mint 10 MWh). A szezonális tárolásra alkalmas P2M üzem teljesítményét, jellemző értékeit a 7. táblázatban találhatjuk. A 5. ábrán egy 20-lábás konténerre vonatkoztatva az egyes elemek méretarányos blokkjai láthatók; természetesen a valóságban nem így festenek, hiszen például a metanizáló berendezés egy hosszú „csőreaktor” lenne, amit a magasságkorlát miatt feldarabolva, kaszkád-rend-



5. ábra. A P2M üzemben keletkezett hulladékhő felhasználási lehetőségei

szerbe kellene elhelyezni. A segédberendezések (kompresszorok, esetlegesen hűtőberendezések) nem szerepelnek az ábrán.

A téli napokon, amikor az adott fogyasztó megújuló forrásból (PV) származó energiatermelése nem haladja meg a fogyasztását, akkor a moduláris P2M üzem láthatja el energiával. A tárolt metán mennyisége akár több száz óráig is elláthatja a 20 kW-os gázturbinát üzemanyaggal, így biztosítva a feltételezett település (vagy bármilyen más fogyasztó) energiaigényét.

7. táblázat. A szezonális energiátárolásra alkalmas P2M üzem teljesítmény- és kapacitásjellemzői

Technológiai egység		Teljesítmény/térfogat
Elektrolizátor		15 kW (input); 2,8 Nm ³ H ₂ /h (output)
Metanizáló		0,7 Nm ³ CH ₄ /h (output)
Metán visszaalakítás		20 kW oxy-fuel gázturbina
Tárolók	Metán (200 bar)	2,5-6 m ³
	Hidrogén	–
	Szén-dioxid	1 m ³
	Víz	1 m ³
	Oxigén	1 m ³

Pusztán szezonális energiátárolásra alkalmazni a P2M üzemet nem feltétlenül gazdaságos. A metán előállítás a jelenlegi EU-s energiamixből, vásárolt vagy levegőből kinyert szén-dioxidból nem gazdaságos és valószínűleg hosszú ideig nem is lesz az [7]. Abban az esetben, ha olyan szén-dioxidot használunk fel, amelyet egyéb célra nem alkalmaznának, illetve a villamosenergia-forrásunk, valamilyen többlet megújuló energia, akkor a P2M üzem igenis rentábilis alternatíva a szezonális energiátárolás területén.

Konklúzió

A tanulmányban kétféle koncepciót vázoltunk a kisméretű, moduláris P2M üzemre. A két konstrukció alapvetően az egyes technológiai elemek teljesítményében, illetve kapacitásában különbözik.

A le- és felszabályozást végző tárolók szerepe már a közeljövőben felértékelődik, így ennek gyakorlati hasznossága megkérdőjelezhetetlen. Ameddig a konvencionális elektrokémiai energiátárolók alkalmasak a napon belüli szabályozásra, addig a leszabályozási többlet villamos energia – a jelen állás szerint – szinte csak a Power-to-Gas technológiákkal „fogyasztható el”. Ezen a területen a P2M előnye a PtH-el szemben, hogy a tárolt energia metán formájában közönséges berendezéseket igényel (gázturbina, gázmotor), míg a hidrogén visszaalakítása (üzemanyagcella) sokkal drágább technológiát kíván meg, emellett a hidrogén tárolása is sokkal nehezebb. Ennek ellenére a PtH rendszer sokkal jobb összehatásokkal dolgozik, hiszen a metanizáló ilyenkor nem tartozik a technológiai sorba.

A szezonális energiátároló koncepció esetében a üzemben belüli egységek teljesítménye eltérő lehet. Itt feltételeztük azt, hogy a tárolót egy nyár alatt töltjük fel a többlet villamosenergiával, amelyet például egy PV park termel. Ilyenkor a fő cél nem a hálózat szabályozása, hanem például egy kisebb település vagy ipari park ellátása villamosenergiával. Ekkor az output oldali gázturbina vagy gázmotor teljesítménye mérsékelte, hiszen a fogyasztó oldal nagyjából egyenletes teljesítménnyel vételez.

A feltöltő (vízbontó és metanizáló), tároló (tartályok) és kisütő (gázturbina vagy üzemanyagcella) egységek egymástól függetle-

nek. Közülük az első és a harmadik a tároló (töltési és kisütési) teljesítményét, míg a középső a tárolási kapacitást határozza meg. Mivel az ezekkel kapcsolatos igények függetlenek, így hasznos lehet, ha szétválasztjuk a feltöltő, tároló és kisütő részeket. Ezzel a kapacitás és teljesítmény szétválasztható lesz, adott feltöltő-teljesítmény mellé rakhatunk több, akár külső tárolót is (növelve a kapacitást) és esetleg kisebb kisütő-egységet (növelve az ellátási időt). Ezzel a továbbra is zárt ciklusú pseudo-akkumulátor szélesebb körben lesz alkalmazható. Érdekes, hogy az „energiatároló anyag” (jelen esetben metán) csatolt, de leválasztható tartályokban való tárolása a P2M pseudo-akkumulátort hasonlóvá teszi egy valódi akkumulátor-típushoz, a vanádium-redox áramlási akkumulátorokhoz, ezzel még inkább kiemelve a módszer „pseudo-akkumulátorságát”.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2020-3.1.1-ZFR-KVG-2020-00006 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2020-3.1.2-ZFR-KVG pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

- [1] Sterner, M.; Specht, M. Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept. *Energies* 2021, 14, 6594. <https://doi.org/10.3390/en14206594>
- [2] Imre Attila, Kummer Kristóf: Szezonális és hosszútávú energiátárolási lehetőségek, *Energiagazdálkodás* 62/6 (2021) 2-9
- [3] Kummer, K.; Imre, A.R. Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology. *Energies* 2021, 14, 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>
- [4] Zavarkó, Máté ; Csedő, Zoltán: Körkörös gazdaságfejlesztési és dekarbonizációs lehetőségek a power-to-gas technológia magyar szennyvíztisztító telepeken való alkalmazásával, *Hidrológiai Közöny*, 101/3 p. 60 (2021)
- [5] Zavarkó, M.; Imre, A.R.; Pörzse, G.; Csedő, Z. Past, Present and Near Future: An Overview of Closed, Running and Planned Biomethanation Facilities in Europe. *Energies* 2021, 14, 5591. <https://doi.org/10.3390/en14185591>
- [6] Pintér, G. The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries—A Case Study. *Energies* 2020, 13, 6408. <https://doi.org/10.3390/en13236408>
- [7] Kummer Kristóf: A Power-to-Methane technológia alkalmazhatósága a hazai energiátárolásban, diplomatervezés (témavezető: Dr. Imre Attila Rikárd), BME, 2021
- [8] Leeuwen C., Zauner A. (2018): Report on the Costs Involved with P2G Technologies and Their Potentials Across the EU; STORE&GO Project: Karlsruhe, Germany.
- [9] Gábor Pörzse, Zoltán Csedő, Máté Zavarkó (2021): Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology, *Energies* 2021, 14(8), 2297; <https://doi.org/10.3390/en14082297>
- [10] A földgáz árának változása, online: <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas>
- [11] Agora Verkehrswende und Agora Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende, 129/04-S-2018/DE 07-2018-DE, Berlin
- [12] Jachin Gorre, Felix Orloff, Charlotte van Leeuwen (2019): Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an

- optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage, *Applied Energy* Volume 253, 1 November 2019, 113594, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113594>
- [13] STORE&GO (2019): Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimisation, Technisch-wissenschaftlicher Verein Josef-Wirmer-Str. 1–3 53123 Bonn, ISBN 978-3-00-064736-9
- [14] Michael Sterner, Ingo Stadler (2019): *Handbook of Energy Storage - Demand, Technologies, Integration*, Springer, ISBN 978-3-662-55503-3, DOI 10.1007/978-3-662-55504-0.
- [15] Munk K. (2008): *Taschenbuch der Mikrobiologie*, pp.367-369, Thieme Verlag, Stuttgart, ULB Darmsatdt
- [16] Krajete A. (2012): *Archaea microorganisms for biological power storage*, Krajete GmbH, VDI-Fachkonferenz "Stationäre Energiespeicher für Erneuerbare Energien", Karlsruhe.
- [17] Krajete A. (2013): *Biological Methanation for Intermittent Power Storage*, 2. In OTTI Power-to-Gas Konferenz Regensburg, Regensburg (Vol. 480)
- [18] Hey B. (2012): *Power-to-Gas als Möglichkeit zur Speicherung eines Energieüberangebots und als Bestandteil eines flexiblen Demand Side Managements*. HAW Hamburg (Masterthesis)
- [19] Reuter M. (2013): *Power-to-Gas: Biological methanization; first at a municipal sewage plant*, 8th International Renewable Energy Storage Conference, Berlin
- [20] Mohammad Mohammadzadeh Bahar, Keyu Liu (2008): *Measurement Of The Diffusion Coefficient Of CO₂ In Formation Water Under Reservoir Conditions: Implications For CO₂ Storage* SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, October 2008. <https://doi.org/10.2118/116513-MS>
- [21] Schlautmann R., Böhm H., Zauner A., Mörs F., Tichler R., Graf F., Kolb, T. (2021): *Renewable Power-to-Gas: A Technical and Economic Evaluation of Three Demo Sites Within the STORE&GO Project*. *Chemie Ingenieur Technik*, 93: 568-579. <https://doi.org/10.1002/cite.202000187>
- [22] Krich, K., Augenstein, D., Batmale, JP, Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. (2005): *Biomethane from Dairy Waste, a Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas*. UC Berkeley: California Institute for Energy and Environment (CIEE). Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/35k1861z>, Chapter 4, 73.o.
- [23] Zheng, L. (2011): *Overview of oxy-fuel combustion technology for carbon dioxide (CO₂) capture*. In *Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) Capture* (pp. 1-13). Woodhead Publishing.
- [24] Abraham B. M., Asbury J. G., Lynch E. P., Teotia A. P. (1982): *Coal-oxygen process provides CO₂ for enhanced recovery*, *Oil Gas J.*; (United States), 80(11)
- [25] Wang C. S., Berry G. F., Chang K. C., Wolsky A. M. (1988): *Combustion of pulverized coal using waste carbon dioxide and oxygen*. *Combustion and Flame*, 72(3), 301-310.
- [26] Dugué J. (2000): *The Use of Oxygen for Industrial Combustion: Summary of the 17th IFRF Topic Oriented Technical Meetings*, International Flame Research Foundation Document No. D121/y/6, 26 September 2000
- [27] Charon O. (2000): *Recent Developments and Future trends in Oxy-Combustion Applications*, International Flame Research Foundation 17th Topic Oriented Technical Meeting, Les Vaux de Cernay, France.
- [28] v. G. Sundkvist, A. Dahlquist, J. Janczewski, M. Sjödin, M. Bysveen, M. Ditaranto, Ø. Langørgen, M. Seljeskog, M. Siljan (2014): *Concept for a combustion system in oxyfuel gas turbine combined cycles*, *J. Eng. Gas Turbines Power*. Oct 2014, 136(10): 101513 (10 pages), <https://doi.org/10.1115/1.4027296>
- [29] S. V. M. Guaitolini, I. Yahyaoui, J. F. Fardin, L. F. Encarnação, F. Tadeo (2018): *A review of fuel cell and energy cogeneration technologies*, 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC.2018.8362573.
- [30] H. Kim (2011): *Modeling and Control System Design of an MCFC System*, 4th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, pp. 84-89
- [31] S. Kim (2014): *Optimization of molten carbonate fuel cell (MCFC) and homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine hybrid system for distributed power generation*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 1826-1840.
- [32] N. Minh (2004): *Solid oxide fuel cell technology – features and applications*. *Solid State Ionics*, 2004. Vol. 174, pp. 271-277.
- [33] O. Yamamoto (2000): *Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects*. *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 2423-2435
- [34] J. A. Matelli (2001): *Sistemas de Cogeração Baseados em Células-Combustível Aplicados em Hospitais*. Universidade Federal de Santa Catarina, pp. 1-136
- [35] C. Souleymane, J. Zhao, W. Li (2021): *Efficient utilization of waste heat from molten carbonate fuel cell in parabolic trough power plant for electricity and hydrogen coproduction*, *International Journal of Hydrogen Energy*, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.210>.
- [36] *Power-to-Gas Hungary Kft. About*. 2021., online: <https://p2g.hu> (accessed on 16 July 2021)
- [37] J. Bertsch, C. Growitsch, S. Lorenczik, S. Nagl (2016): *Flexibility in Europe's power sector – An additional requirement or an automatic complement?*, *Energy Economics*, vol. 53, issue C, 118-131
- [38] Pintér G. (2020): *The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries – A Case Study*, *Energies* 2020, 13(23), 6408; <https://doi.org/10.3390/en13236408>
- [39] *Hydrogenics online*: https://etipwind.eu/wp-content/uploads/A2-Hydrogenics_v2.pdf.
- [40] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=methane&Units=SI>
- [41] Kaderják Péter: *Magyar Tudomány Ünnepe 2021 - Fenntartható Energetika* (<https://www.ek-cer.hu/magyar-tudomany-unnepe/>)

Power-to-Methane technológia: műszaki összegzés és esettanulmány

Groniewsky Axel¹, Kustán Réka¹ és Imre Attila^{1,2}

(1) Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem;

(2) ELKH - Energiatudományi Kutatóközpont

A paksi atomerőmű bővítésével, valamint az időjárás függő villamosenergia termelés nagyarányú növelésével középtávon a magyar energiaszektor jelentős átalakulása várható. Mivel ezek a változások megnehezítik a villamosenergia-hálózaton belüli frekvenciatartást, szükség lesz energiatárolók beépítésére a hazai rendszerbe. A Power-to-Methane technológia segítségével metán formájában válik tárolhatóvá a villamos energia. Jelen dolgozat célja a technológia műszaki lehetőségeinek ismertetése, valamint annak bemutatása, hogy hogyan növelhető a tárolási eljárás átalakítási határfoka a villamosenergia betáplálási oldalára illesztett szerves Rankine-ciklus segítségével.

*

With the expansion of the Paks nuclear power plant and the significant increase in weather-dependent electricity generation, a major transformation of the Hungarian energy sector is expected in the medium term. As these changes will make it more challenging to maintain the frequency of the electricity grid, it will be essential to integrate energy storage facilities into the domestic system. Power-to-Methane technology allows electricity to be stored in the form of methane. This paper aims to describe the technical potential of the technology and show how the conversion efficiency of the storage process can be increased by using an organic Rankine cycle on the side of the electricity feed-in.

A Nemzeti Energia- és Klímatervben [1] megfogalmazott, a széndioxid-mentes villamosenergia-termelés részarányának növelésére vonatkozó célkitűzések a magyarországi villamosenergia-szektor jelentős átalakulását vetítik előre a következő évtizedben. A szektor átalakításának központi elemét – klímavédelmi és levegőtisztasági szempontok alapján – a 2030-ra tervezett paksi atomerőmű további két 1200 MW_e-os blokkal történő bővítése, valamint a napelemes kapacitások ~6500 MW_e-ra történő növelése jelenti. Figyelembe véve, hogy az éves bruttó rendszerterhelés napi negyedórás csúcserőértéke 2018-ban 6869 MW_e volt (8878 MW_e bruttó beépített és 7415,9 MW_e rendelkezésre álló teljesítőképesség mellett), ezek a kapacitások a 2030-ban várható terhelési értékekhez mérten (2029-re 7526 és 8007 MW_e közötti éves csúcsterhelés várható) is jelentősek lesznek [2].

Mivel a hosszabbított üzemidejű, négy darab 500 MW_e-os paksi blokk 2032 és 37 között kerül leállításra, terv szerinti forgatókönyv esetén 2030-ban egyszerre lesz jelen a hazai kb. 8000 MW_e-os csúcsgényű rendszerben 4274 MW_e nukleáris alapú, valamint a széllel együtt 6230 MW_e időjárásfüggő (megújuló) nettó beépített teljesítmény [3]. Ez egyrészt kedvező, hiszen ebben az időszak-

ban önellátóvá válhat az ország, másrészt komoly kihívásokat is jelent, mert a hazai VVER-440-es és tervezett VVER-1200-as blokkok csak korlátozott mértékben képesek menetrendtartó szerepet ellátni.

A hazai villamosenergia-rendszerben a VVER blokkok alaperőműként üzemelnek, kihasználási óraszámuk messze 5500 h/év felett van és döntően a névleges üzemállapotok környékén üzemelnek. Fontos azonban megjegyezni, hogy az alaperőművi üzemvitel – adott műszaki szempontok teljesülése mellett – elsősorban gazdasági kérdés. Ha a déli órákban megjelenik több ezer MWe magát korábban leírt, olcsó napenergia, az az atomerőművek működését is átolthatja a menetrendtartó tartományba. Bár hivatalos adat erre vonatkozóan nincs, a VVER-440-es blokkok fel- és leterhelési sebessége 1-2 MWe/perc körül mozog, aminek a vastagfalú tartályok (reaktortartály, gőzfejlesztő-kollektor, köpeny, térfogat-kompenzátor) 20 °C/h körüli maximális hőmérsékletváltozási sebessége szab fizikai korlátot. A névleges üzemállapottól pedig ritkán térnek el jobban, mint 50-60 MW_e/blokk (25-30 MW_e/gőzturbina). Összehasonlításképpen elmondható, hogy egy menetrendtartó tartományban üzemelő blokk terhelési sebessége – technológiától függően – a 10-20 MW_e/perc közötti tartományba esik, terhelése pedig 40-100% között szabályozható.

A VVER-1200-as blokknál a VVER-440-hez hasonló fizikai korlátokat, valamint 70-100% közötti szabályozhatóságot feltételezve, könnyen belátható, hogy a villamosenergia-rendszeren belüli frekvenciatartáshoz – amennyiben az exportált mennyiség a fogyasztáshoz képesti többletforrásnál kevesebb – energiatárolók beépítését teheti szükségessé [4]. A tárolt energia formáját tekintve – ebben a mérettartományban – megkülönböztethetünk mechanikai, elektrokémiai/elektromos, valamint a PtM technológiát is magába foglaló alternatív, alacsony szén-dioxid-kibocsátású tüzelőanyagokon alapuló villamosenergia-tárolókat [5].

Az alternatív tüzelőanyag alapú energiatárolók általában nagy energiasűrűséggel és nagy teljesítménysűrűséggel, de alacsony tárolási határfokkal rendelkeznek, amit elsősorban az energiaátalakítási lánc során jelentkező veszteségek befolyásolnak. Ennek az energiatárolási módszernek előnye, hogy az elektroszintetizált tüzelőanyagok az előállítás helyétől eltérő helyen is felhasználhatók, azaz oxidálhatók. Amennyiben a tárolt tüzelőanyag gáz halmazállapotú, Power-to-Gas (PtG) technológiáról beszélünk [6].

A PtG gyűjtőfogalom, amely magába foglalja az energia hidrogénné (PtH), vagy metánná (PtM) történő alakítását. Az így kapott vegyületek elsősorban energiahordozóként kerülnek felhasználásra, de lehetőség van a létrejött anyagok kémiai alapanyagként történő további hasznosítására is [7]. Mivel a PtM technológia közbelső terméke H₂, ami már önmagában is felhasználható energiatárolásra, kételyek merülhetnek fel a technológia hasznosságáról (azaz a hidrogén továbbalakításának szükségességéről). Mint egyéb ese-

tekben, itt is elmondható, hogy minél hosszabb egy átalakítási lánc, az átalakítás során jelentkező veszteségek mértéke annál nagyobb, ugyanakkor a végtermék is annál értékesebb lehet.

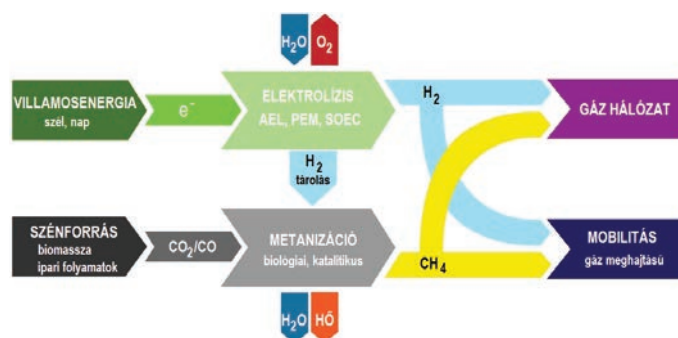
A PtM technológia számos előnnyel rendelkezik a PtH-el szemben. A PtM technológia a kiépített földgáz hálózatok infrastruktúráit használva rugalmasan tudja kezelni a hullámzó betáplálást, így elentétben a PtH technológiával, ahol az energetikailag, pénzügyileg és technológiailag is kedvező H₂ tárolási és szállítási megoldások még váratnak magukra, a PtM alkalmas hosszú távú (szezónális) és nagyméretű energiatárolásra [8], kisebb veszteség mellett, mint villamos energia esetében [7]. CH₄-nak nagyobb az energiasűrűsége, mint a H₂-nek (LHV_{CH₄}=1359 kWh/m³; LHV_{H₂}=272 kWh/m³ [9]) ami további előny a tárolás és szállítás szempontjából. A H₂-nek magasabb az adiabatikus láng hőmérséklete, mint a CH₄-nak (T_{H₂}=2254 °C, T_{CH₄}=1963 °C), így közvetlen tüzelésére csak erre a célra kialakított égőkkel van lehetőség, esetleg más tüzelőanyagba való bekeverés mellett.

A PtM technológia hazai terjedését két tényező hátráltathatja: a biometán előállításához szükséges tiszta CO₂ alacsony mennyisége, valamint a PtH-hez képesti alacsonyabb átalakítási hatások. Az átalakítási hatások (kibocsátott anyagáram energiatartalma (HHV) és a bevitt energia hányadosa) H₂ esetében – kompresszió nélkül – 64-77% között (elektrolízis), míg CH₄-re történő átalakítás esetében 51-65% között változnak [10].

Szem előtt tartva a hazai villamosenergia-hálózat középtávú fejlődési irányát, alábbi tanulmány áttekintést ad a PtM eljárás résztechnológiáiról, valamint egy esettanulmányon keresztül bemutatja, hogyan növelhető a PtM technológia átalakítási hatások egy, a villamos energia betáplálási oldalára illesztett szerves Rankine-ciklus (ORC) illesztésén keresztül.

PtM technológiai áttekintése

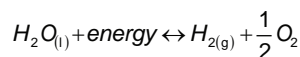
Azzal, hogy a villamosenergia-átviteli hálózatban időszakosan jelentkező többlet villamos energiát a PtM technológia – habár ez a PtG technológiáról általánosan is elmondható – képes a vezetékes földgáz hálózatba táplálható gázzá alakítani, a technológia összekapcsolja a villamos és földgáz hálózatokat [11]. A folyamat két lépésben, vízbontással történő H₂ előállítása, valamint az előállított H₂ külső CO vagy CO₂ forrás segítségével történő metanizációja révén játszódik le (lásd 1. ábra). Az így létrejött helyettesítő földgáz (Substitute Natural Gas, SNG) már alkalmas a hálózatba való betáplálásra. A termékgáz fűtőértéke azonban alacsonyabb lehet, mint a hagyományos földgázé, mivel a helyettesítő földgázban nem található hosszú szénláncú szénhidrogének. (Hagyományos földgázban a 80% feletti metántartalom mellett megtalálható még a fűtőértéket növelő etán, propán és bután, kisebb mennyiségben pedig az azt csökkentő inertek, N₂ és CO₂ [11]).



1. ábra. A Power-to-Gas technológia folyamata [11]

Vízbontás elektrolízissel

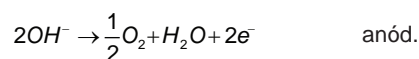
Az elektrolízis egy olyan elektrokémiai folyamat, amely során az elektromos energia (egyenáram) kémiai energiává alakul. A redoxreakciók az elektrolízáló cellában mennek végbe, amely során az elektrolit oldatba lógatott két elektróda közül a kationok a negatív töltésű katód felületén redukálódnak, míg az anionok a pozitív töltésű anód felületén oxidálódnak. A PtM technológiához szükséges H₂ előállítására a H₂O disszociációja révén kerül sor, az endoterm reakció pedig az alábbi:



A reakció energiaigényét az alkalmazott technológia határozza meg, és függ a hőmérséklettől valamint nyomástól, amin a reakció végbemegy [12]. A Faraday-törvény értelmében az elektrolízis során termelt H₂ arányos az elektromos áram nagyságával, így az alkalmazott technológiák célja, hogy egy adott felületű elektrolízáló cellán minél magasabb áramsűrűséget érjenek el. Az elektrolízis hatásfokát a termelt H₂ fűtőértékének – amit a felhasználástól függően számolhatunk HHV_{H₂}=3.54 kWh/Nm vagy LHV_{H₂}=3 kWh/Nm³ értéken – valamint az elektrolízis során felhasznált villamos energiának a hányadosa [13] adja. A vízbontásra használt három legjelentősebb eljárás az alkálikus, vagy lúgos elektrolízis, a protoncserélő-membrános (PEM) elektrolízis, valamint a magas hőmérsékletű (HTE), vagy szilárd-oxidos elektrolízis (SOEC).

Alkálikus, vagy lúgos elektrolízis (AEL)

A lúgos elektrolízis tekinthető a legkiforrottabb technológiának, amelyet már MWe méretben is alkalmaznak nagyüzemi H₂ termelésre. A két elektródát membrán (diafragma) választja el egymástól, az elektrolit pedig általában egy erősen korrózív, 25-30%-os vizes KOH-oldat. Az elektródák felszínén kiváló termékgázok és hő eltávolítása érdekében az elektrolitot vagy szivattyúval, vagy a magas hőmérsékletgradiens miatt kialakuló természetes áramlással keringetik. Az egyes termékgázokban (H₂ és O₂) dús elektrolitot külön szeparátorban tárolják, ami egyben a folyadék gáz szétválasztást is végzi. A H₂ termékgáz minősége a szárítást követően 99.5-99.9% között, míg az O₂ termékgáz esetén 99-99.8% között változik, ami katalitikus tisztítással (dezoxidálás) akár 99.999% fölé vihető. A nagy tisztaságú gáz fenntartása fontos a tárolás biztonsága, valamint üzemanyagcellában történő közvetlen felhasználás szempontjából. Az elektródokon lejátszó reakciók az alábbiak:



Ahogy a folyamatok is mutatják, víz az anód oldalon keletkezik és a katód oldalon kerül felhasználásra.

Viszonylag széles teljesítménytartományban mozgó technológia, a legkisebb egységeknek 55 kW_e (H₂ termelése 0.4 Nm³/h), a legnagyobbaknak pedig 3.5 MW_e (H₂ termelése 760 Nm³/h) villamosenergia-fogyasztásuk van [14]. A legkisebb teljesítményű egységek hatásfoka 47% körül, a legnagyobbaké pedig 82% körül mozog. A gáz tisztaságától függően hidegindításra perces (min. 10 perc) vagy órás intervallumban van lehetőség, a készenléti idő pedig másodperces vagy perces lehet. Üzemi nyomása 1 bar és 30 bar között, üzemi hőmérséklete pedig 65 °C és 100 °C között változhat. Fajlagos költsége 1000 €/kW körül mozog, élettartama pedig 15 – 30 év között változhat [11], [15].

Az alkálikus elektrolízis három legjelentősebb problémája az alacsony részterhelési tartomány (40% körüli részterhelési határ), alacsony áramsűrűség és alacsony nyomású működés. A diafragma nem akadályozza meg teljesen a termékgáz kereszt-diffúzióját. Az O_2 katód oldalra való diffúziója csökkenti a cella hatásfokát, mivel az O_2 ismét vízzé katalizálja a H_2 -t. Egy O_2 oldalon bekövetkező részleges H_2 diffúzió is rontja a hatásfokot, valamint a biztonságot. Ennek a veszélye alacsony terhelésen (4 mol% H_2) nagy. Az alacsony áramsűrűség a folyékony elektrolit és diafragma miatt fellépő magas ohmos veszteségek eredménye. A folyékony elektrolit másik hátránya, hogy nem teszi lehetővé a magas nyomáson történő működést, ami egy terjedelmes kialakításhoz vezet [16].

Protoncserélő-membrános elektrolízis (PEM)

A vízbontásra alkalmazott PEM technológiát 1966-ban fejlesztette ki a General Electric, de csak 1978-ban tette kereskedelmi forgalomba elérhetővé. Protoncserélő-membrán választja el egymástól a két félcellát (és a termékgázokat), vezeti a protonokat, valamint felelős az elektródák elektromos szigeteléséért. A korrozív, erősen savas rendszer a katalízishez nemesfémek használatát teszi szükségessé, anódnál irídiumot, katódnál platinát használnak. Részben ezzel is magyarázható, hogy a technológia fajlagos költsége kétszerese (>2000 €/kW) az alkálikus eljárásnak. Működés során az anódot vízzel látják el, és az elektródokon az alábbi reakciók játszódnak le:



A szilárd polimer elektrolitmembrán csak nagyon kis keresztmetszeten áteresztő, ami alacsony gázátbocsátási sebességet eredményez, a hagyományos lúgos elektrolízishez képest pedig nagyobb tisztaságú, jellemzően 99.99%-t meghaladó H_2 termelhető szárítás után. PEM-elektrolízis a szilárd elektrolitnak és a lúgos elektrolízishez képest nagyobb áramsűrűségű működésnek köszönhetően kompakt modul kialakítással rendelkezik. A nagy áramsűrűség kedvező dinamikai tulajdonságokat eredményez [16], amik hatékony működést tesznek lehetővé olyan körülmények között, ahol az áramfelvétel lökészerű (szél- és napenergia). A szilárd elektrolit szerkezeti tulajdonságai szintén lehetővé teszik nagy nyomáskülönbség kialakítását a H_2 és az O_2 oldala között (jelenleg 350 bar nyomáskülönbség is elérhető). Részterhelésre a teljes üzemi tartományban (0%-100%) képes.

A lúgos elektrolizátorhoz hasonlóan viszonylag széles teljesítménytartományban mozgó technológia, a legkisebb egységeknek 12 kW_e (H_2 termelése 0.53 Nm³/h), a legnagyobbaknak pedig 2 MW_e (H_2 termelése 400 Nm³/h) villamosenergia fogyasztásuk van. A legkisebb teljesítményű egységek hatásfoka 52% körül, a legnagyobbaké pedig meghaladja a 60%-ot. A hidegindításra perces intervallumban van lehetőség, a készenléti idő pedig másodperces. Üzemi nyomása 1 bar és 30 bar között, üzemi hőmérséklete pedig 20 °C és 100 °C között változhat. Fajlagos költsége 2000 €/kW körül mozog, élettartama rövidebb mint a lúgos technológiáé, 5 - 20 év között változik [14], [16].

Szilárd-oxidos elektrolízis (SOEC)

A magas hőmérsékletű elektrolízissel kapcsolatos kutatások 1968-ban indultak a General Electric, két évvel később pedig a Brookhaven National Laboratory működésével. Németország-

ban a Dornier System GmbH végzett ilyen irányú kutatásokat 1975 és 1987 között a HOT ELLY (High Operating Temperature ElectroLYsis) projekt keretében [17].

Az eljárás az utóbbi években a szilárd-oxidos üzemanyagcellák területén elért eredmények miatt került az érdeklődés középpontjába. SOEL magas, 700-900 °C közötti hőmérsékleten üzemel, amivel mind az AEL, mind pedig a PEM eljárásoknál magasabb hatásfokot tudnak elérni, azonban a technológiát anyagstabilitási kihívások jellemzik. Az elektródokon az alábbi reakciók játszódnak le:



A SOEC egy érdekes jellemzője, hogy alkalmas a CO_2 és vízgőz együttes elektrolízisére (ko-elektrolízis), amely során H_2 és CO tartalmú szintézisgáz állítható elő. Tovább növeli a technológia jövőbeni alkalmazásának lehetőségét a SOEC elektrolizáló cellaként, valamint üzemanyagcellaként való rugalmas működtetésének lehetősége is [16], [18].

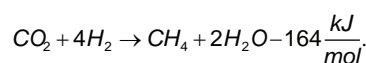
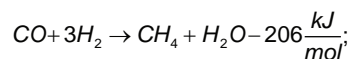
SOEC még mindig kísérleti állapotban van, a jelenleg futó, laboratóriumi léptékű kutatások elsősorban az elektrolízisnél alkalmazható új, alacsony költségű, de tartós anyagok irányába indult el, mivel nem megoldott a magas hőmérsékleten alkalmazott kerámiák tartós üzemvitel [11]. Ennek megfelelően a következő években még nem várható, hogy valós alternatívája legyen vízbontás tekintetében a korábban említett két technológiának, így ennek az eljárásnak a részletesebb bemutatására nem kerül sor.

Metanizáció

A P2M technológiában megkülönböztethető biológiai és katalitikus metanizáció [19]. Míg a katalitikus folyamatokban többségében nikkel és ruténium alapú katalizátorokat használnak [20], és a folyamat magas, 250 °C feletti hőmérsékleten megy végbe, addig a biológiai metanizáció során a metanogén mikroorganizmusok funkcionálnak biokatalizátorként [11], a folyamatok pedig – a termofil baktériumtörzseknek köszönhetően – jóval alacsonyabb, általában 70 °C alatti hőmérsékleten játszódnak le. Ellentétben a katalitikus eljárással, ahol a metanizáció hatékonysága 70 és 85% között változik, addig a biológiai metanizációval 95% feletti hatékonyság is elérhető [21].

Katalitikus metanizáció

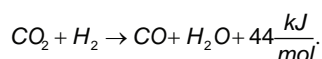
Katalitikus metanizáció az az eljárás, amely során metán (CH_4) kerül előállításra szén-monoxid (CO) vagy szén-dioxid (CO_x) hidrogénezésével. A CO_x metanizációs reakcióit először Sabatier és Senderens fedezte fel 1902-ben [22]. A két exoterm reakciót az alábbi egyenletek írják le 298K hőmérsékleten:



A reakciót a reagáló gázok jelentős térfogatcsökkenése jellemzi, amely a CO -metanizáció esetében 50%, míg CO_2 -metanizáció esetében 40% körüli. Mindkét reakció egyensúlyát befolyásolja a nyomás és a hőmérséklet. Termodinamikai egyensúlyban a magas nyomás kedvez, míg a magas hőmérséklet korlátozza a metánképződést.

CO_2 -metanizáció a CO -metanizáció és a fordított víz-gáz reakció lineáris kombinációja, amely minden esetben kíséri a

CO-metanizációt, ha nikkeltalízátorok használata mellett mennek végbe a reakciók:



A CO₂ átalakulása azonban gátolt, ha a CO-koncentráció meghalad egy bizonyos küszöbértéket.

Mivel a metanizáció erősen exoterm folyamat – ahogy azt a reakcióegyenletek is mutatják –, a reaktorban keletkező reakcióhő elvonására számos megoldás született, így pedig a technológia csoportosítható a folyamathoz alkalmazott reaktorok típusa alapján. Ezek a reaktorok tipikusan 200 °C és 550 °C között üzemelnek, 1 és 100 bar közötti tartományban. A metanizáció katalizátoraként többféle fémet (Ni, Ru, Rh, és Co) alkalmaznak, azonban a magas aktivitás, jó CH₄ szelekció és alacsony nyersanyagár miatt a nikkeltalízátorok a legelterjedtebbek [11], [23].

A metanizációs technológiák közötti fő különbséget a reaktoron belüli hőmérsékletprofil jelenti. Háromféle hőmérsékleti profilt különböztetünk meg: az adiabatikus, az izotermikus, és a politropikus.

Adiabatikus fixágyas reaktor

A külső vagy integrált hűtés nélküli fixágyas reaktorok jellemzően közel adiabatikus hőmérsékleti profilt mutatnak, az ágyban egy határozott forró ponttal és magas reaktor-kilépési hőmérséklettel. Általában 2-5, tipikusan közbelső hűtővel ellátott adiabatikus reaktorból áll [24]. Mivel a metanizációs katalizátorok nem bírják az 550-700 °C feletti hőmérsékleteket, gázviszszavezetésre vagy gőz hozzáadására lehet szükség. A technológia előnye a nagy reakciósebesség és a magas hőmérsékleten történő gőztermelés lehetősége, hátránya a viszonylag összetett folyamat körülményes beállítása [22].

Fluidágyas reaktor

A szilárd anyag keveredése közel izoterm hőmérsékletprofilt eredményez a reaktoron belül, megkönnyítve ezzel a szabályozást. Az így létrejött hatékony hőelvonás lehetővé teszi, hogy a metanizáció egy meglehetősen egyszerű kialakítású reaktorban menjen végbe [25]. Ugyanakkor a fluidizáció során jelentkező magas mechanikai terhelés növeli a katalizátor és a reaktor falának kopását, ami a katalizátor leállásához vezethet [26]. Szintén hátránya az eljárásnak, hogy a buborékképződés miatt nem teljes a CO₂ konverzió. Ezenkívül a fluidizált ágyas reaktort korlátozza a reaktoron belüli gázsebesség, ami egyrészt a minimális fluidizációs feltételek biztosítása érdekében nem lehet túl alacsony, ugyanakkor a katalizátor elutriálódásának elkerülése érdekében túl magas sem [11].

Háromfázisú metanizációs reaktor

Az iszapreaktorban lévő folyékony fázisban (általában termoolajok) finom katalizátor részecskék szuszpendálnak a gázáramlás eredményeként. A magas hőkapacitású folyékony fázis jelenlétében megvalósítható a hatékony és pontos hőmérsékletszabályozás. Így a reakcióhő teljes egészében elvonható és a reaktor szinte teljesen izoterm módon üzemeltethető, amivel egyszerű folyamattervezés válik megvalósíthatóvá. Az iszapreaktorok működtetésében jelentkező kihívás a gáz folyadék anyagátadási ellenállás, valamint az szuszpenziós folyadék bomlása és párolgása [11], [27].

Strukturált reaktorok

Az olyan strukturált reaktorokat, mint a monolit reaktorok, már az adiabatikus fixágyas reaktorok hátrányainak, nevezetesen a hő-

mérsékleti forrópont és nagy nyomásesés kezelésére fejlesztették ki. A belső fémszerkezetük hővezetésének köszönhetően a monolit reaktorok sugárirányú hőszállítása – az alkalmazott anyagtól függően – két-három nagyságrenddel nagyobb mértékű [80]. A mikrostrukturált reaktorok nagyon kompakt egységek, nagy felület-térfogat aránnyal és hőátadással, valamint kis nyomáseséssel rendelkeznek. A strukturált reaktorok hátrányai a katalizátor-lerakódás a fémszerkezeten, valamint a deaktivált katalizátor cseréje (ha a katalizátor egyszer már deaktiválódott, az egész reaktort új katalizátorbevonattal kell ellátni) [11], [28], [29], [30].

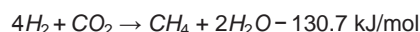
Biológiai metanizáció

A biológiai metanizáció alapját mindig egy CH₄-ben szegény gáz képezi (pl.: biogáz, depónia-gáz, szintézis gáz), amelyet első lépésben a toxikus és korrozív anyagoktól (H₂S, Si, CO, NH₃, sziloxánok és illékony szerves komponensek) kell megtisztítani, majd ezt követi a fűtőérték növelése. A mikrobák – H₂ jelenléte mellett – képesek anyagcseréjük révén a biogázban jelen levő CO₂-ot CH₄-ná alakítani. Amennyiben a keletkezett gáz CH₄ koncentrációja eléri a 95-98%-ot, a termék-gáz biometán (bioCH₄) [31].

Törzsek szempontjából megkülönböztethetők az energiáját kémiai úton, szerves forrásból nyerő kemoautotróf, valamint az energiát fényből nyerő fotoszintetikus baktériumtörzseket.

Kemoautotróf módszerek

A hidrogenotróf metanogén Archea törzsek katalizációja az alábbi módon játszódik le:



A katalizáció helye alapján megkülönböztethetünk in-situ, ex-situ és hibrid metanizációt. In-situ metanizáció esetén a biológiai metanizáció helye a biogáz termelő, szerves anyag lebontást végző reaktor. Ilyenkor a metanizáció, valamint az anaerob degradáció [32] egy reaktorban játszódik le, nincs szükség külön reakció edényre. A fermentációs paraméterek megfelelő értéken tartása mellett, valamint a H₂ megfelelő ütemű adagolásával megközelítőleg 99%-os CO₂ konverzió érhető el, azonban a mikrobiológiai rendszerek érzékenyek a H₂ adagolásra, aminek szabályozása a nagy, gyakran 2-3000 m³-es biogáz üzemi reaktorokban nehézkes lehet, így ez a megoldás nem hatékony.

Az ex-situ technológiák lényege, hogy a PtG reakció egy külön reaktorban zajlik. Az eljárás előnye, hogy a CO₂ származhat füstgázból, depónia gázból, biogázból vagy szintézis gázból is, valamint, hogy a H₂ bevitelnél nem kell figyelembe venni az anaerob degradációért felelős törzseket, csak a hidrogenotróf metanogéneket. Az eljárás hátránya az újabb reaktor edény miatti beruházási költségtöbblet. A legnagyobb kihívást az oldott H₂ koncentráció növelése jelenti, amit intenzív keveréssel, a gáz-folyadék felület növelésével és/vagy a H₂ nyomás fokozásával lehet elérni [31]. A technológiával jellemzően 70-98% közötti CH₄ koncentráció érhető el.

Hibrid technológia esetén a biológiai metanizáció az ex-situ technológiához hasonlóan külön reakció edényben játszódik le, de az in-situ technológiához hasonlóan biogáz termelő anaerob baktériumok jelenléte mellett. Előnye az in-situ eljáráshoz képest, hogy a tartály mérete kisebb, így a szabályozás jobban kézben tartható. A módszer tervezési stádiumban van, közvetlen kísérleti eredményeket még nem publikáltak.

Fotoautotróf módszerek

A fotoszintetikus biogáz tisztítás során a biogázból kivonjuk a CO₂-t, így CH₄-ben gazdag gázelegyet kapunk. A módszer előnye, hogy a fotoszintetizáló szervezetek (algák, cianobaktériumok) a H₂S-t is megkötik tovább tisztítva a biometánt. Alapvetően két típusa létezik a fotobioreaktor rendszereknek: a zárt (cső vagy téglatest formában) és nyitott (high rate algal ponds). A zárt rendszerek hatékonysága, kis hely igénye és vízszükséglete kedvezőbb a nyitott rendszerekkel szemben, de a felállításához és működtetéséhez szükséges befektetések mértéke és energiaszükséglete nagyban megdrágítja a technológiát. Ezzel szemben a nyitott rendszerek igen alacsony beruházási és fenntartási költséget igényelnek, azonban kevésbé hatékony CO₂ felvétellel rendelkeznek. Mindkét rendszer képes a biogázban a CO₂ koncentrációját az előírt 2-6%-ra csökkenteni [31], [32], [33].

Hatásfok-növelés hulladékhő-hasznosítással

Egy villamosenergia-tároló berendezés hatásfoka a kinyert villamos energia és a betáplált villamos energia hányadosa. Ez sohasem 100%, mindig vannak veszteségek. Erre egy, talán mindenki által ismert példa az akkumulátorok (pl. mobiltelefon) töltésekor tapasztalt melegedés, amikor jól mérhető-érzékeltető a disszipációs hő formájában távozó veszteség. Veszteség felléphet a villamosenergia betárolásakor, a terheletlen állapotú tároláskor, illetve a kisütéskor. Gyakran eltekintenek a terheletlen állapotban fellépő, időfüggő veszteségtől, bár épp ennek alacsony volta az, ami a PtM technológiát szezonális tárolásnál versenyképesé teszi az akkumulátoros vagy hidrogénes tárolási módokkal szemben [34], [35]. Ebben a könnyen tárgyalható „fél-ideális” esetben a teljes tárolási hatásfok az alábbi formában írható fel:

$$\eta = \frac{E_{ki}}{E_{be}} = \frac{E_{ki}}{E_t} \frac{E_t}{E_{be}} = \eta_{ki} \eta_{be}$$

azaz a tárolási hatásfok (η) a kivehető (E_{ki}) és betáplált (E_{be}) villamos energia hányadosa. Amennyiben a betáplálás és a kinyerés térben és/vagy időben kellően távol van egymástól, akkor szemléletes a tárolás két „folyamatra” való felbontása, amelyeknek a hatásfoka η_{be} (betárolás) és η_{ki} (kinyerés). Ez esetben van egy közbülső mennyiségünk, a tárolóban „elvíleg” meglevő energia. Ez PtM esetben az előállított metánban levő energia, ami elvileg az égéshővel, gyakorlatilag inkább a fűtőértékkel jellemezhető; ekkor a η_{be} mennyiség a bio-metán előállítási hatásfokaként kezelhető.

A tárolási hatásfok kétféleképp növelhető; a gyakoribb fajtája az, amikor a betárolt villamos energia kinyerését igyekeznek minél jobban megoldani, azaz adott mennyiségű tárolt energiából (E_t) minél többet próbálnak kinyerni (E_{ki}). Ez a PtM technológiánál a metán → villamosenergia-visszaalakítás minél jobbá tételét jelenti. Ennek egyik oka az átalakításkor veszteségként távozó energiarész egy részének visszanyerése. A talán leggyakoribb metán → villamos energia (vagy földgáz → villamos energia) átalakítási technológiában gázmotorokat alkalmaznak; ekkor a veszteség (akár 60-70%) magas hőmérsékletű, azaz „jó minőségű” hulladékhő formájában távozik. Magas hőmérsékletű hulladékhőből viszonylag könnyű villamos energiát visszanyerni; rengeteg kutatás foglalkozik az ilyen visszanyerő technológiák gázmotorokra telepítésével és már kaphatók is ilyen berendezések. Ilyenek például a később ismertetendő szerves Rankine-ciklusú (ORC) berendezések is [36].

A hatásfok-növelés másik útja, hogy valamiképp csökkentjük az adott mennyiségű tárolt energiához (E_t) minél kevesebb villa-

mos energiát kelljen betáplálni (E_{be}). A betápláláskor keletkező hulladékhő hasznosítása – főképp biometanizációnál, amikor ez a hő viszonylag alacsony hőmérsékletű – eddig nem volt vizsgálat tárgya. Viszont az utóbbi években az alacsony hőmérsékletű hőforrásokra alkalmazható energiatermelő berendezések sokat fejlődtek, így korábban nem hasznosíthatónak gondolt hőforrások is hasznosíthatóvá váltak, bár viszonylag kis határfokkal. Az alacsony hőmérsékletű elektrolízisre és az azt követő biológia metanizációra épülő PtM technológiánál az elektrolíziskor és a metanizációnál is keletkezik hulladékhő; ezekből villamosenergiát előállítva és ezt visszatáplálva az elektrolizátorra, csökkenthető a bemenő villamosenergia mennyisége, így – azonos tárolt energia (E_t) mellett – a betáplálási hatásfok (η_{be}) és ezen keresztül a teljes tárolási hatásfok is növelhető.

A következőkben a szerves Rankine ciklus bemutatása után egy konkrét esetet vizsgálunk és megmutatjuk, mekkora növekmény érhető el ezzel a technológiával.

Szerves Rankine-ciklus

A Rankine-ciklus egy olyan termodinamikai körfolyamat, amely a hő mechanikai munkává, generátor alkalmazása mellett pedig villamos energiává alakítja. A körfolyamat egykomponensű, kétfázisú munkaközege a víz. Mivel a víz termofizikai tulajdonságai alacsony hőmérsékletszinteken csak nagyon kedvezőtlen hatásfok mellett teszik lehetővé az energiaátalakítást, 350 °C alatti hőmérsékletterományban elterjedtek a hasonló felépítésű, de szerves munkaközeget használó körfolyamatok, a szerves Rankine-ciklusok (ORC).

Az alkalmazott munkaközeg telített gőzös fázisgörbéjének T-s diagramon vett meredeksége alapján megkülönböztethető nedvesítő, izentróp és szárító munkaközeg. A munkaközeg ilyen típusú osztályozására azért van szükség, mert ez jelentősen befolyásolja az ORC felépítését és működését. Ha a körfolyamat a vízhez hasonlóan nedvesítő lenne (2. ábra a, b), akkor a szivattyú (1,2) után az előmelegítőbe belépő közeget (2,3) nem csak el kellene gőzöltetni (3,4), de túl is kellene hevíteni (4,5), mivel egy telített gőz halmazállapotból indított expanzió esetén (4,6*) a nedvességtartalom olyan mértékben megnőne az expanderben kilépő csonkján, amely – csepperoziót okozva – már jelentős élettartamcsökkenéshez vezethetne.

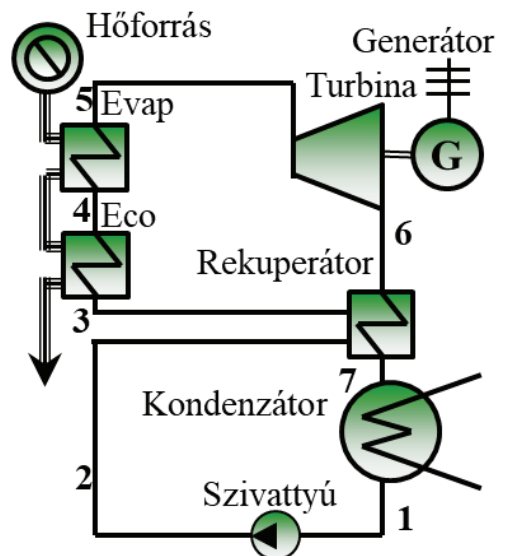
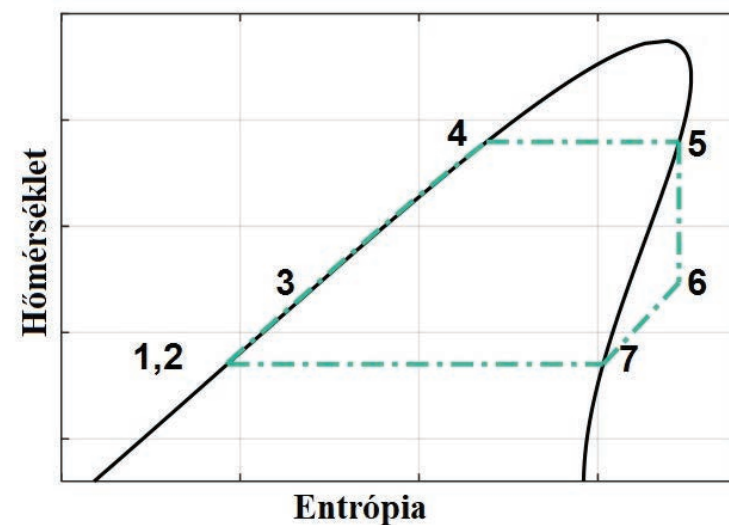
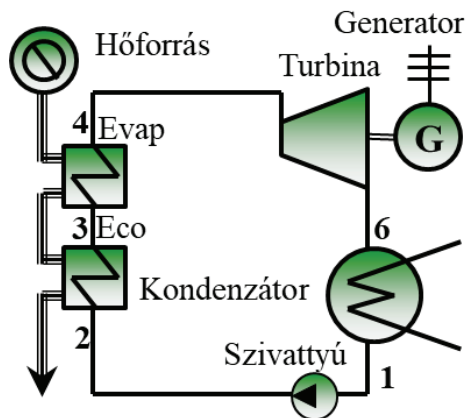
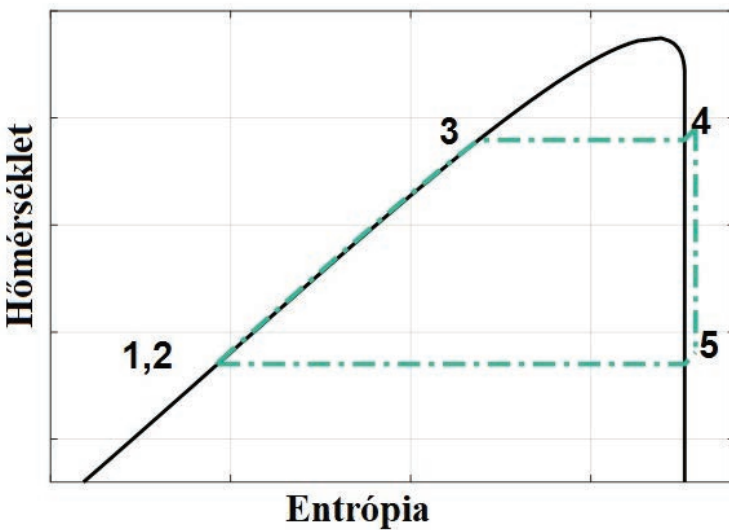
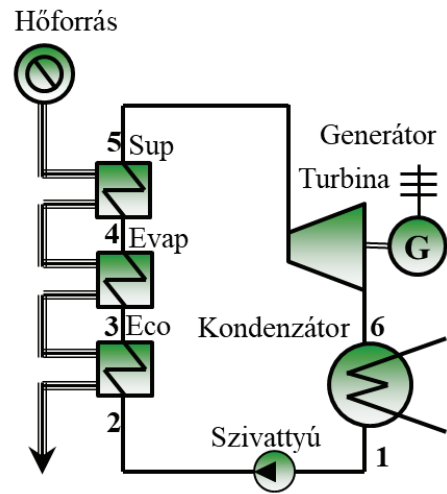
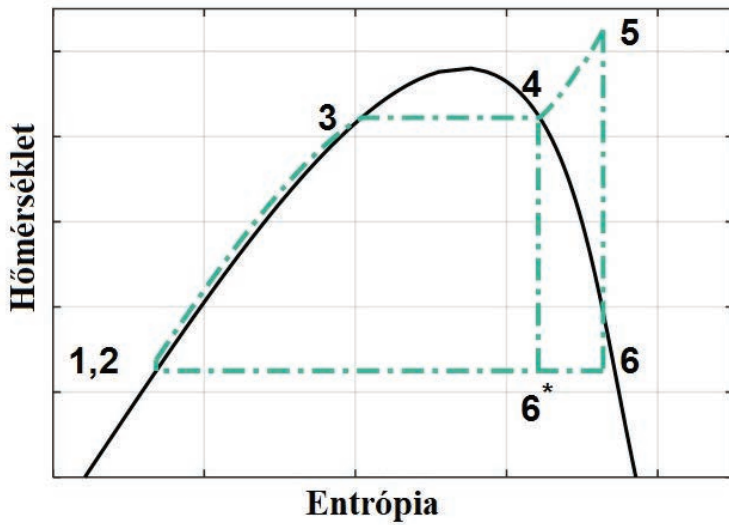
Ezzel ellentétben, egy szárító munkaközeg esetén (2. ábra. e és f) az előmelegítőből kilépő telített gőz (4, 5) egyből expandálható, és nincs szükség túlhevítőre, mivel a munkaközeg tulajdonságai miatt túlhevített gőzként fogja elhagyni az expandert (5, 6). Ennek a megoldásnak azonban hátránya, hogy ha a túlhevített gőz egyből a kondenzátorra jutna, az jelentősen növelné annak hőterhelését és rontaná a hatásfokát. Ezért gyakran alkalmaznak rekuperatív hőcserélőt (6,7), amellyel előmelegíthető a szivattyúból kilépő munkaközeg (2, 3), mielőtt az előmelegítőbe jutna.

Az ideális megoldás azonban az, ha a munkaközeg izentróp (2. ábra c és d), mivel ebben az esetben az expanzió telített gőz halmazállapotból indul és telített gőz halmazállapotba ér véget. Ilyen esetben a körfolyamat üzembiztos megvalósításához nem kellene se túlhevítő, se pedig rekuperatív hőcserélő.

Sajnos a valóságban tökéletesen izentróp munkaközeg nem létezik, ahogy ideális expanzió sem. Azonban ha figyelembe vesszük az expander hatásfokát, és olyan munkaközeget választunk, amellyel megvalósíthatóvá válik, hogy az expanzió telített gőz halmazállapotból induljon és közel telített gőz halmazállapotban érjen véget, feleslegessé válik mind a túlhevítő, mind pedig a rekuperatív hőcserélő, és egy termodinamikailag ideális megoldást

kapunk, maximális tengelyteljesítményt leadni képes konstrukcióval. A valós expanziót figyelembe vevő, termodinamikailag ideális munkaközegválasztással kapcsolatos kutatásokról bővebben a [37] közöl eredményeket.

A továbbiakban az kerül bemutatásra, hogy hogyan növelhető egy biológiai metanizáción alapuló, alkálikus elektrolízisű PtM technológia átalakítási hatásfoka szerves Rankine-ciklus illesztésén keresztül.



2. ábra. T-s diagramok és a hozzájuk tartozó ORC kapcsolások nedves (a, b), izentróp(c, d) és száraz (e, f) munkaközegűek esetén. [38]

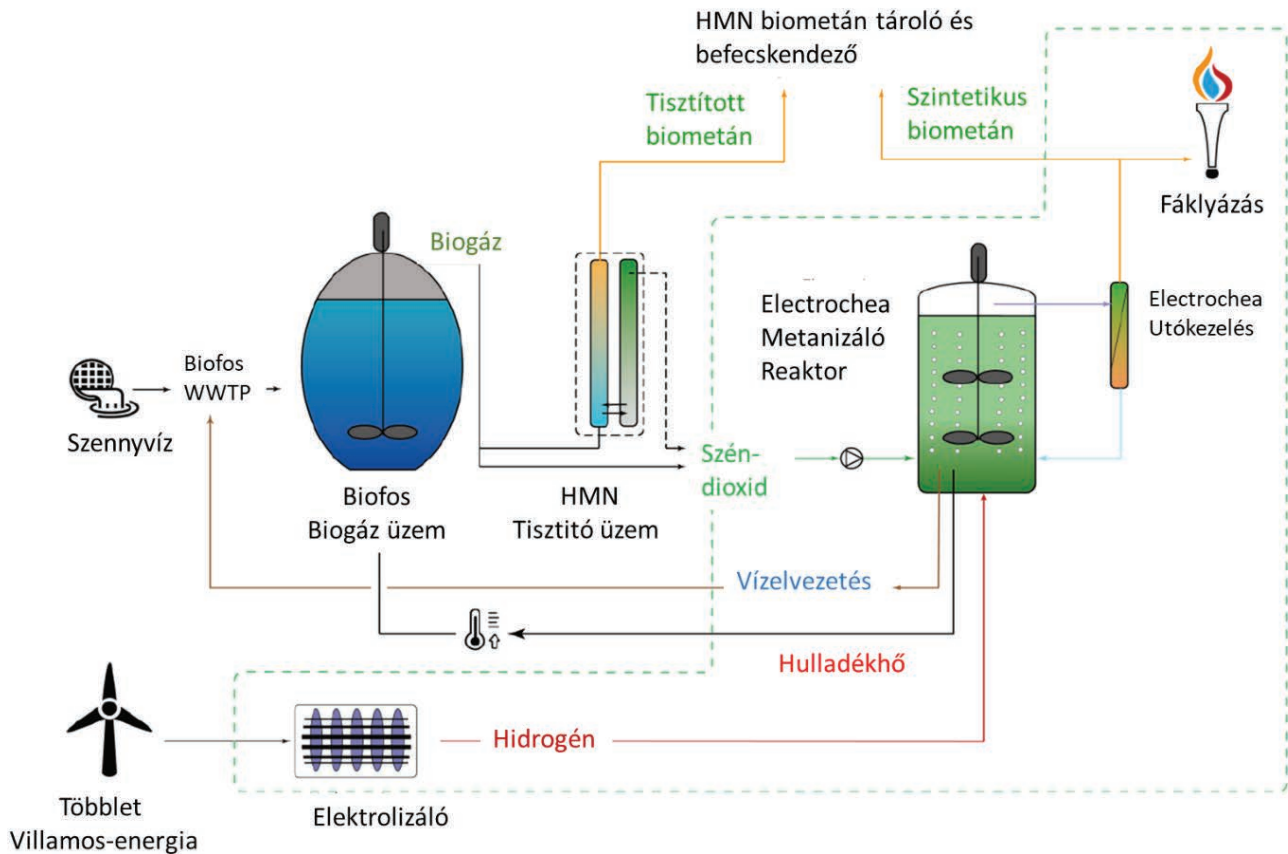
Esettanulmány

Referencia bio-metanizáló rendszer bemutatása

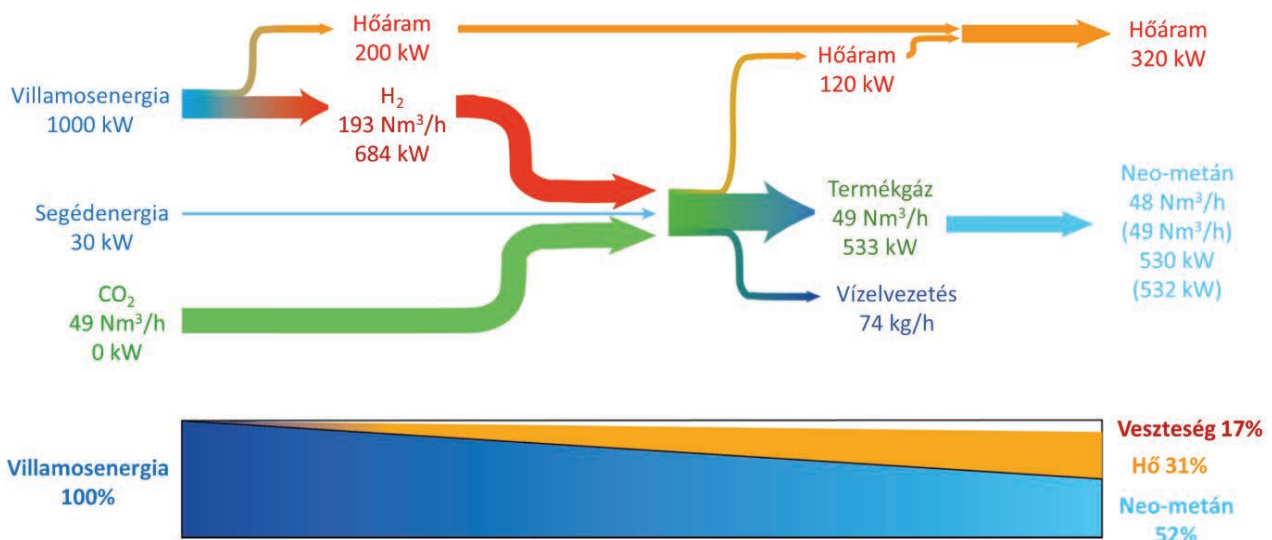
A bio-metanizáció folyamán keletkező hulladékhő ORC-ben való hasznosításának vizsgálata során referenciaként alkalmazott biometán előállító (BioCat) üzemet 2015 novembere és 2016 márciusa között állították fel Avedøre-ben (Dánia, Koppenhága vonzáskörzet), a BIOFOS szennyvíztisztító telephelyén. A rendszer, melynek kapcsolása a 3. ábrán látható, magába foglalja a 9 m magas BioCat reaktort egy 12 m magas vázban, egy 600 kW teljesítményű elektrolizátort, továbbá több konténert a közművek számára (vízlá-

gyítás, magas tisztaságú sűrített levegő, vezérlőterem és gázelemző).

Az üzemet 50 Nm³ CO₂/h kezelésére tervezték. Szénforrásként vagy a városi szennyvíziszap anaerob lebontása során keletkező biogázt, vagy a befecskendezés előtt a nyers biogáz tisztítása során keletkező mellékgázt alkalmazzák. A biológiai metanizációhoz szükséges hidrogént a helyszínen egy elektrolizáló berendezés állítja elő, melynek maximális termelési kapacitása 110 Nm³ H₂/h. A biológiai reaktort elhagyó gázt utókezelésnek vetik alá a víz, a por és a szennyeződések, valamint a felesleges H₂ és/vagy a nem reagált CO₂ eltávolítása érdekében. Az utókezelési fázisok során



3. ábra. Referencia bio-metanizáló üzem bemutatása [39]



4. ábra. A referencia bio-metanizáló rendszer energia mérlege [39]

keletkező maradékgázt visszavezetik a reaktorba, míg a főáram a földgázhálózatba kerül betáplálásra. A bemutatott referenciaüzemben a reaktor által termelt metabolikus hő egy vízhurkon került visszavezetésre a Biofos-hoz, hogy a biogáz előállítás hőigényét támogassák [39].

Az általunk vizsgált modellben a biológia-metán előállítás során keletkező hulladékhő teljes mennyisége szerves Rankine-ciklusban kerül felhasználásra. A rendszerben két ponton keletkezik elegendően magas hőmérsékletű hulladékhő, az egyik a már említett reaktorban képződő metabolikus hő, a másik pedig az elektrolízis során keletkező, levegővel elvezetett hő. A referencia bio-metanizáló rendszer energia mérlege a 4. ábrán látható.

A vizsgált modellben alkálikus elektrolizáló és ex-situ biológiai metanizáció van, melynek alapján szakirodalomban található adatok segítségével becsülhető, hogy az egyes pontokon milyen hőmérsékleten áll rendelkezésre a hulladékhő. Az ORC-ben használható hulladékhő paraméterei az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat. Bio-metanizálóban keletkező hulladékhő

Keletkezési pont	Közeg	Hőáram [kW]	Hőmérséklet [°C]	Nyomás [bar]	Tömegáram [kg/s]
Elektrolizáló	levegő	200	70	30	39,498
Bio-rektor	víz	120	65	1	5,736

ORC

Az ORC-vel kialakított hulladékhő hasznosítás modellezése során négy különböző lehetőség került elemzésre. Vizsgáltuk, azt az esetet, melyben egy darab ORC hasznosítja az összes hulladékhőt sorosan kapcsolt hőcserélőkön keresztül. Ezen belül modelleztünk egy iparilag rendelkezésre álló rekuperatív hőcserélővel kialakított eljárást, továbbá egy, a turbina belső veszteségeit figyelembe vevő, maximális tengelyteljesítményt leadni képes konstrukciót (az expanzió telített gőz állapotból indul és telített gőz állapotig tart). A másik vizsgált lehetőség pedig az, ahol a hulladékhő keletkezési helyén

közvetlenül telepítünk ORC-eket. Ebben az esetben kétszer két gép működését modelleztük, az előző esetben bemutatott konstrukciók lehetőségeihez hasonlóan – ipari rekuperatív hőcserélős és telített gőz állapotból telített gőz állapotba tartó expanziós megvalósítás. Az összes esetben az ORC munkaközeg kondenzációjához szükséges hűtőközeget 20 °C-os levegőnek tekintettük. A modellezést követően a kapott eredmények összehasonlításra kerültek.

Eset I

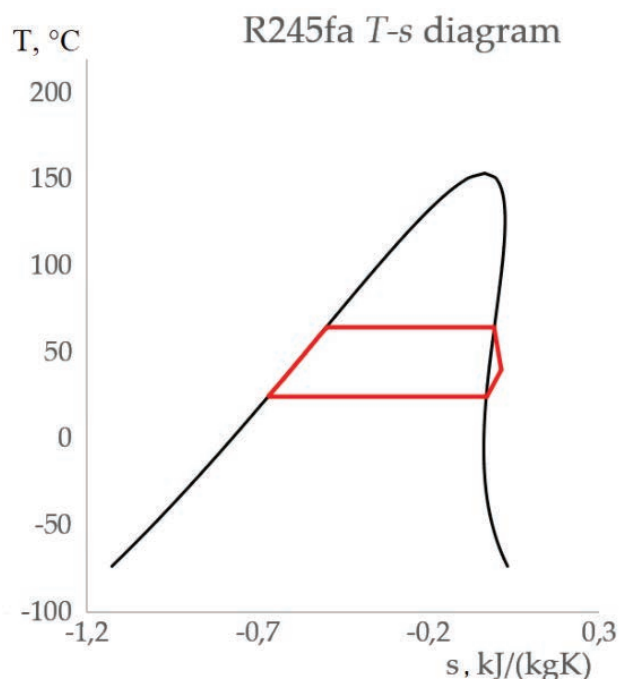
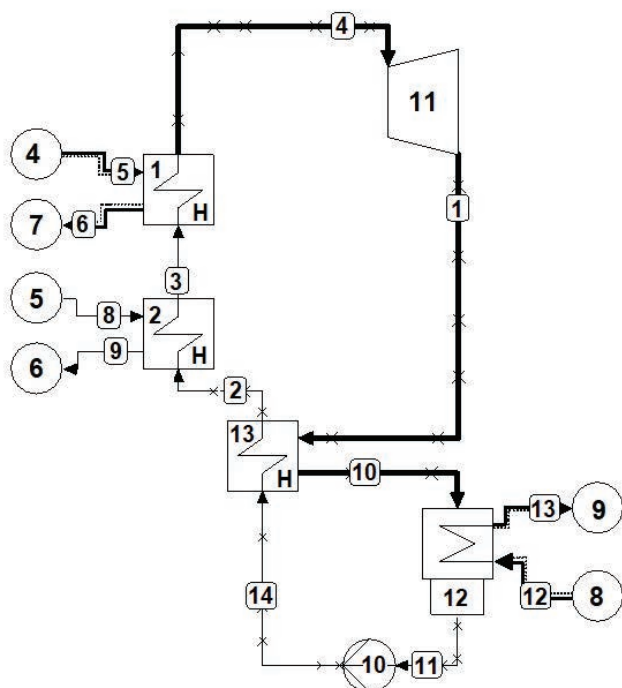
Az összes keletkező hulladékhő hasznosítása egy darab ORC-ben valósult meg két sorba kapcsolt hőcserélőn keresztül. A modellekben az első hőcserélőben hasznosult az elektrolizálóban keletkező hő, míg a második hőcserélőben a bio-rektorból származó hő felhasználása történt.

- *1/a eset:* Az ORC modellezése ipari konstrukció alapján valósult meg, melynek alapjául az Electratherm által forgalmazott, az adott hőmérsékleti határok között működő berendezés szolgált. A rendszerről található információk alapján az alkalmazott munkaközeg ebben az esetben R245fa (ElectraTherm Inc.), az expander pedig iker-csavar expander, melynek irodalmi adatok alapján [40] felvett belső hatásfok 72%. A vizsgált modell kapcsolása az 5. ábra bal, a folyamat T-s diagramja pedig a jobb oldalán található.

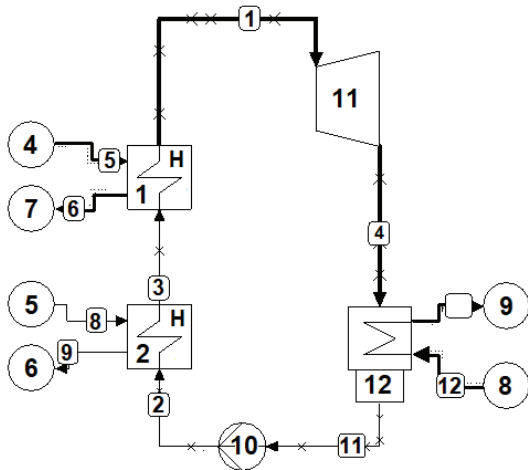
A hőcserélőkben hasznosult hőmennyiség, a hulladékhőhasznosítás mértéke, a körfolyamat hatásfoka, valamint a leadott teljesítmény a 2. táblázatban található.

2. táblázat. Ipari konstrukció mellett kialakított ORC energetikai mutatói

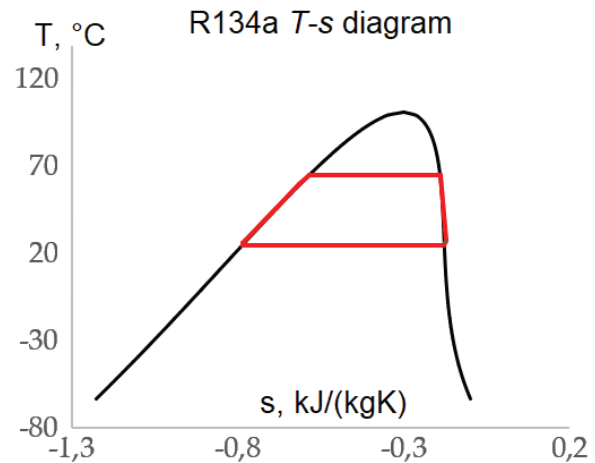
	Q, kW		P, kW
HTX1	199,15	T11	17,31
HTX2	38,63	P10	-0,33
Q	237,78	Q/Q _{hossz}	74,30%
O _{hossz}	320,00	η _{ORC}	7,14%



5. ábra. Balra: hulladékhő hasznosítás modellezése egy ORC-ben ipari konstrukció mellett; Jobbra: R245fa T-s diagramjában felvett folyamat



6. ábra. Balra: hulladékhő hasznosítás modellezése egy ORC-ben optimális munkaközeg alkalmazásával; Jobbra: R134a T-s diagramjában felvett folyamat



A rendszer leadott teljesítménye 7,14%-os körfolyamati hatásfok mellett 16,98 kW, mellyel a bio-metán előállítási folyamat hatásfoka 1,65 százalékponttal növelhető.

- *l/b eset:* A rendszer modellezése során ebben az esetben is 72%-nak tekintettük az expander belső hatásfokát. Ezt figyelembe véve került kiválasztásra a munkaközeg, melynek alkalmazásával maximális tengelyteljesítmény adódik az adott hőmérsékletpáron – adott hőforrás (70 °C) és hőnyelő (20 °C) hőmérséklet mellett – és nincs szükség se túlhevítő, se rekuperatív hőcserélő alkalmazására. A munkaközeg, melyet a modellezés során alkalmaztunk és teljesíti a kívánt feltételeket az R134a. Az optimális munkaközeg választási módszerrel kapcsolatos részletes eredmények megtalálhatóak a [37] forrásban. A 6. ábra bal oldalán a vizsgált kapcsolás, jobb oldalán pedig a folyamat látható T-s diagramban.

Az optimális munkaközeggel kialakított rendszer körfolyamati hatásfoka 6,53%, leadott teljesítménye pedig 17,49 kW, mellyel a bio-metán előállítás hatásfoka (azaz az η_{be}) 1,7 százalékponttal növelhető. A 3. táblázatban a modellhez kapcsolódó szimulációs eredmények találhatóak.

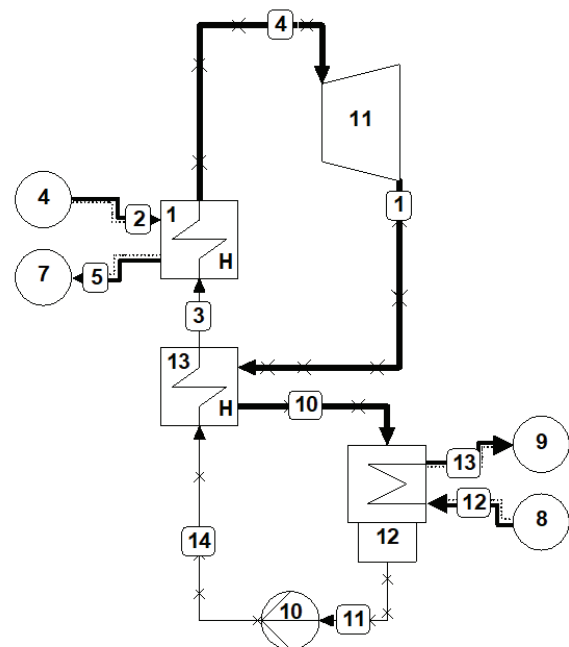
3. táblázat. Az R134a munkaközegű ORC szimulációs eredményei

	Q, kW		P, kW
HTX1	199,15	T11	19,00
HTX2	76,18	P10	-1,51
Q	275,33	Q/Q _{hossz}	86,04%
O _{hossz}	320,00	η_{ORC}	6,35%

Eset II

A hulladékhő a keletkezés helyén került hasznosításra, így ebben az esetben egy elektrolizálóhoz és egy bio-reaktorhoz telepített ORC-t elemeztünk. A II/a. esetben az előzőekben bemutatott ipari konstrukció, a II/b esetben pedig a maximális tengelyteljesítményt adó kialakítás került vizsgálatra a különböző hőforrások esetén.

- A II/a kapcsolások esetén az I/a esethez hasonlóan a munkaközeg R245fa, az expander belső hatásfoka 72% és a rendszerek rekuperatív hőcserélőt is tartalmaznak. A modellezett kialakítás, mely mind a két forráshelyhez azonos felépítésű, a 7. ábrán látható.

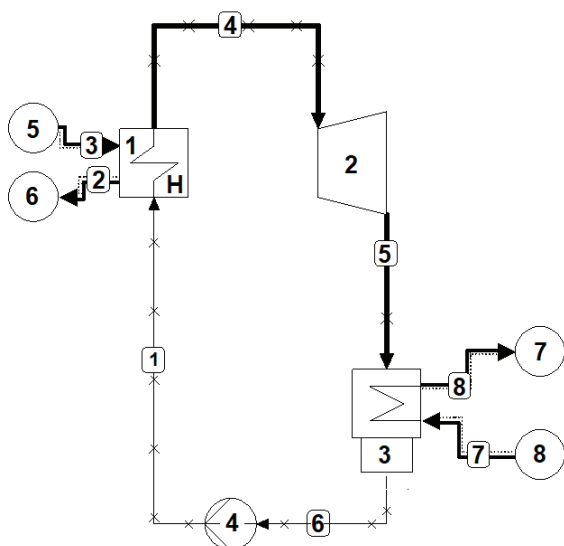


7. ábra. Hulladékhő hasznosító ipari ORC a forrás helyén

Az elektrolizálóhoz kapcsolt ORC hatásfoka 200 kW hulladékhő felhasználása mellett 7,11%, leadott teljesítménye pedig 14,22 kW. A bio-reaktornál keletkező 120 kW hulladékhőt hasznosító ORC hatásfoka 6,38% és leadott teljesítménye 7,66 kW.

- A II/b-ben vizsgált konstrukciók esetében, már nem volt lehetséges az I/b-ben látott munkaközeg alkalmazása, mivel a bio-reaktornál keletkező 65 °C-os hulladékhő esetén az R134a felhasználásával nem érhető el a kívánt maximális tengelyteljesítmény. A választott munkaközeg így a propán, mellyel mind 70 °C mind 65 °C-os hulladékhő esetén elérhető egy 72% belső hatásfokú expanderben a telített gőz állapotból közel telített gőz állapotba érkező expanzió. A vizsgált kapcsolást a 8. ábra mutatja.

Az elektrolizáló 200 kW hulladékhőjének felhasználására kialakított ORC hatásfoka 6,23%, leadott teljesítménye pedig 12,45 kW. A 65 °C-os 120 kW hulladékhőt hasznosító ORC hatásfoka 5,67%-ra, teljesítménye pedig 6,8 kW-ra adódott a szimulációk során.



8. ábra. Hulladékhő hasznosítás ORC-ben optimális munkaközeg alkalmazásával a forrás helyén

Eredmények kiértékelése

A bemutatott esetek szimulációja során kapott eredmények a 4. táblázatban láthatóak.

4. táblázat. Szimulációs eredmények a PtM üzemben keletkező hulladékhő ORC-ben történő hasznosítása esetén

	ORC teljesítmény [kW]	PtM eredeti hatásfok	PtM hatásfok ORC-vel	Hatásfok növekedés [százalékpont]
Eset I/a.	16,98	51,46%	53,10%	1,65
Eset I/b.	17,49	51,46%	53,15%	1,70
Eset II/a.	21,88	51,46%	53,58%	2,12
Eset II/b.	19,25	51,46%	53,33%	1,87

Kizárólag műszaki szempontokat figyelembe véve kedvezőbb megoldás, ha a hulladékhő átalakítása a keletkezési helyén valósul meg, mivel két ORC egység alkalmazásával a megtermelt villamosenergia 40%-al növelhető. Ezen szempontok alapján a legkedvezőbb eset a II/a, melynél 21,88 kW villamosenergia termelhető, ami alkalmas a PtM technológia hatásfokának 2,12%-pontos növelésére.

Gazdasági szempontokat is figyelembe véve csak olyan megoldás képzelhető el, ahol egy darab ORC kerül beüzemelésre sorba kapcsolt hőforrásokkal. Így a legjobb esetnek az I/b adódik. Az itt alkalmazott, általunk preferált maximális tengelyteljesítményre optimalizált munkaközeg választás nem csak műszaki szempontból kedvezőbb, mint a gyárilag rendelkezésre álló társai, hanem a konstrukció is olcsóbb, hiszen kevesebb berendezésre van szükség benne.

Arra is lehetőség van, hogy az ORC-vel a keverő villamosenergia-felvételét váltsuk ki. Tengelykapcsolón keresztül közvetlenül is meghajtható a bio-reaktor keverője. Ebben az esetben nem villamosenergia átalakítás történik, hanem az ORC tengelyteljesítményének közvetlen hasznosítása. Ez a megoldás olcsóbb is (nincs szükség generátorra) és a hatásfoka is jobb (a generátor alkalmazása ugyan csak kis mértékben, de csökkentené a hatásfokot). A 4. táblázat és a 4. ábra adatait összehasonlítva látjuk, hogy a

keveréshez szükséges 30 kW jelentős része (kb. 17-22 kW) fedezhető lenne ebből a forrásból.

Összefoglalás

A cikk elején röviden bemutatuk, hogy miért van a közeljövőben egyre nagyobb szükség nagy tárolási kapacitású energiatárolási megoldásokra. Ezután részletesen ismertettünk egy ilyen megoldást, az úgynevezett Power-to-Methane (PtM vagy P2M) technológiát, amelyben a tárolandó villamosenergia segítségével vízbontással hidrogént állítanak elő, majd ezt biokémiai úton, szén-dioxid hozzáadásával metanizálják. A technológia fő előnye, hogy a keletkező metán együtt tárolható és használható a földgázzal, hátránya viszont az alacsony tárolási hatásfok.

A cikk második felében egy konkrét tároló adatait felhasználva megmutattuk, hogy hogyan növelhető a betáplálási (és így a teljes tárolási) hatásfok is a vízbontó és metanizáló berendezések alacsony hőmérsékletű hulladékhőjének villamosenergiává való visszaalakításával, amihez négy különböző ORC-alapú konfigurációt használtunk. A villamosenergia bio-metánná való átalakításának (azaz a tárolás első részének) a hatásfoka a konfigurációktól függően 1,65-2,12 százalékpontot növekedett. Ez – amennyiben a villamosenergiává való visszaalakítás változatlan marad – a teljes hatásfok ugyanekkora arányú növekedését eredményezheti.

Köszönetnyilvánítás

- A munka a 2020-3.1.1-ZFR-KVG-2020-00006 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2020-3.1.2- ZFR-KVG pályázati program finanszírozásában valósult meg.
- Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.
- Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.
- Ez a publikáció a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

Irodalom

- [1] Innovációs és Technológiai Minisztérium, „Nemzeti Energia- és Klímaterv,” 2020.
- [2] Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt., „A Magyar Villamosenergia -rendszer fogyasztói igényeinek előrejelzése 2019.,” 2019.
- [3] Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt., „A Magyar Villamosenergia- rendszer közép- és hosszú távú forrásoldali kapacitás fejlesztése 2019.,” 2019.
- [4] G. Pintér, „The potential role of power-to-gas technology connected to photovoltaic power plants in the visegrad countries-a case study,” *Energies*, vol. 13, no. 23, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/en13236408.
- [5] C. K. Das et al., „Optimal sizing of a utility-scale energy storage system in transmission networks to improve frequency response,” *J. Energy Storage*, vol. 29, no. February, p. 101315, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101315.
- [6] W. He, M. King, X. Luo, M. Dooner, D. Li, and J. Wang, „Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective,” *Adv. Appl. Energy*, vol. 4, no. July, p. 100060, 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100060.

- [7] H. Blanco, W. Nijs, J. Ruf, and A. Faaij, "Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization," *Appl. Energy*, vol. 232, no. April, pp. 323–340, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.027.
- [8] Z. Csedo, B. Sinóros-Szabó, and M. Zavarkó, "Seasonal energy storage potential assessment of WWTPs with power-to-methane technology," *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, doi: 10.3390/en13184973.
- [9] F. Crotagino, H. Landinger, U. Bünger, T. Raksha, J. Simon, and L. Correias, "Update of Benchmarking of large scale hydrogen underground storage with competing options," 2014. [Online]. Available: http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D2.1_Benchmarking-of-large-scale-seasonal-hydrogen-underground-storage-with-competing-options.pdf.
- [10] M. Lehner, R. Tichler, H. Steinmüller, and M. Koppe, "The Power-to-Gas Concept," in *Power-to-Gas: Technology and Business Models.*, SpringerBr., Springer, 2014, pp. 7–17.
- [11] M. Götz et al., "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
- [12] A. Ursúa, L. M. Gandía, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.
- [13] J. Mergel, M. Carmo, and D. Fritz, "Status on Technologies for Hydrogen Production by Water Electrolysis," *Transit. to Renew. Energy Syst.*, pp. 425–450, 2013, doi: 10.1002/9783527673872.ch22.
- [14] A. Mazza, E. Bompard, and G. Chicco, "Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. April, pp. 794–806, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.072.
- [15] A. Buttler and H. Spliethoff, "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2017, pp. 2440–2454, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
- [16] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [17] W. Dönitz and E. Erdle, "High-temperature electrolysis of water vapor-status of development and perspectives for application," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 10, no. 5, pp. 291–295, 1985, doi: 10.1016/0360-3199(85)90181-8.
- [18] M. A. Laguna-Bercero, "Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review," *J. Power Sources*, vol. 203, pp. 4–16, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.12.019.
- [19] Zavarkó Máté (Corvinus University of Budapest), "Energetikai diszruptív technológiafejlesztés által indukált változásvezetési modellek," Corvinus University of Budapest, 2021.
- [20] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinus, V. Tietze, B. Kumar, and D. Stolten, "Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 12, pp. 4285–4294, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.123.
- [21] H. Blanco and A. Faaij, "A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. August 2017, pp. 1049–1086, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.062.
- [22] S. Rönsch et al., "Review on methanation - From fundamentals to current projects," *Fuel*, vol. 166, pp. 276–296, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.111.
- [23] M. A. Vannice, "The Catalytic Synthesis of Hydrocarbons from Carbon Monoxide and Hydrogen," *Catal. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 153–191, 1976, doi: 10.1080/03602457608073410.
- [24] I. Kiendl, M. Klemm, A. Clemens, and A. Herrman, "Dilute gas methanation of synthesis gas from biomass gasification," *Fuel*, vol. 123, pp. 211–217, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.01.036.
- [25] J. Kopyscinski, T. J. Schildhauer, and S. M. A. Biollaz, "Methanation in a fluidized bed reactor with high initial CO partial pressure: Part I-Experimental investigation of hydrodynamics, mass transfer effects, and carbon deposition," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 5, pp. 924–934, 2011, doi: 10.1016/j.ces.2010.11.042.
- [26] C. H. Bartholomew, "Mechanisms of catalyst deactivation," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 212, no. 1–2, pp. 17–60, 2001, doi: 10.1016/S0926-860X(00)00843-7.
- [27] J. Lefebvre, M. Götz, S. Bajohr, R. Reimert, and T. Kolb, "Improvement of three-phase methanation reactor performance for steady-state and transient operation," *Fuel Process. Technol.*, vol. 132, pp. 83–90, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.10.040.
- [28] C. Janke, M. S. Duyar, M. Hoskins, and R. Farrauto, "Catalytic and adsorption studies for the hydrogenation of CO₂ to methane," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 152–153, no. 1, pp. 184–191, 2014, doi: 10.1016/j.apcatb.2014.01.016.
- [29] Z. Liu, B. Chu, X. Zhai, Y. Jin, and Y. Cheng, "Total methanation of syngas to synthetic natural gas over Ni catalyst in a micro-channel reactor," *Fuel*, vol. 95, pp. 599–605, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.12.045.
- [30] K. P. Brooks, J. Hu, H. Zhu, and R. J. Kee, "Methanation of carbon dioxide by hydrogen reduction using the Sabatier process in microchannel reactors," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 4, pp. 1161–1170, 2007, doi: 10.1016/j.ces.2006.11.020.
- [31] M. Szuhaj, Z. Bagi, and K. Kovács L., "A „Power-to-Gas” és kapcsolódó biogáz tisztítási biotechnológiai eljárások," *ENERGIAGAZDÁLKODÁS*, vol. 60, no. special issue, pp. 13–16, 2019.
- [32] I. Angelidaki et al., "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnol. Adv.*, vol. 36, no. 2, pp. 452–466, 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [33] R. Muñoz, L. Meier, I. Diaz, and D. Jeison, "A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 727–759, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9379-1.
- [34] K. Kummer and A. R. Imre, "Seasonal and multi-seasonal energy storage by power-to-methane technology," *Energies*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/en14113265.
- [35] A. R. Imre and K. Kummer, "Szezonális és hosszútávú energiátárolási lehetőségek," *ENERGIAGAZDÁLKODÁS*, vol. 62, no. 6, pp. 2–9, 2021.
- [36] S. Marami Milani, R. Khoshbakhti Saray, and M. Najafi, "Exergo-economic analysis of different power-cycle configurations driven by heat recovery of a gas engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 186, no. September 2018, pp. 103–119, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.030.
- [37] R. Kustán, A. R. Imre, and A. Groniewsky, "The effect of internal efficiency of expander on the working fluid selection," in *IIR International Rankine 2020 Conference -Heating, Cooling and Power Generation - Refrigeration Science and Technology, 2020*, vol. 2020-July, no. July, pp. 351–357, doi: 10.18462/iir.rankine.2020.1170.
- [38] A. R. Imre and A. Groniewsky, "Various Ways of Adiabatic Expansion in Organic Rankine Cycle (ORC) and in Trilateral Flash Cycle (TFC)," *Zeitschrift für Phys. Chemie*, vol. 233, no. 4, pp. 577–594, 2019, doi: 10.1515/zpch-2018-1292.
- [39] M. Kluge and D. Bach, "WP3 – Biogas valorization and efficient energy management (Technical and economic analysis of biological methanation)," 2018.
- [40] Y. Zhao, G. Liu, L. Li, Q. Yang, B. Tang, and Y. Liu, "Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. August, p. 111944, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111944.

A biogáz alapú Power-to-Gas technológia szerepe a magyarországi energiagazdálkodásban

Csányi Szilvia, Dr. Zsiborács Henrik, Dr. Pintér Gábor*, Hegedűsné Dr. Baranyai Nóra, Dr. Vincze András

Pannon Egyetem, Környezeti Gazdaság Egyetemi Központ, Nagykanizsa, Megújuló Energiaforrások Kutatócsoport

*e-mail: pinter.gabor@uni-pen.hu

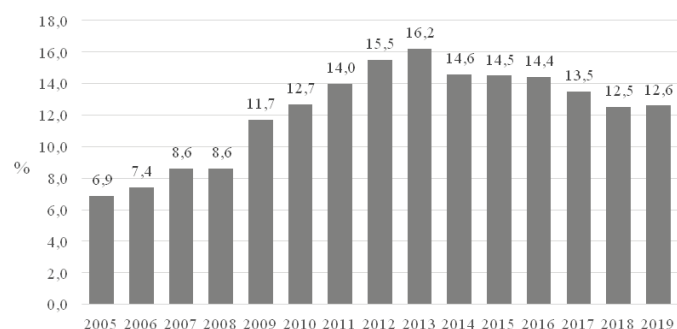
Napjaink egyik legsürgetőbb megoldásra váró problémája, hogy a lehető legkisebb környezeti terheléssel járjon a növekvő globális energiaigény kiszolgálása. Az elmúlt években tapasztalt szélsőséges környezeti hatások arra világítottak rá, hogy a megoldás megtalálásához még nyitottabbá kell válni az új, innovatív lehetőségekre. Az egyes új technológiai vívmányok kiaknázásának mértéke több tényezőn is múlhat, hiszen a probléma bár globális szinten értelmezhető, a lokális megoldások igen eltérőek lehetnek. Ebből kifolyólag a helyi lehetőségek, illetve igények részletes felmérésén túl, szükséges az egyes technológiák felhasználásának korlátait is megismerni. Ezt követően a lehetőségeket és korlátokat együttesen vizsgálva lehet megoldást találni az egyes technológia adott helyzetben (és időpontban) való reális hasznosíthatóságára. A hazai adottságokat, és az elmúlt évek tendenciáit alakító tényezőket figyelembevéve kell kiválasztani a Magyarországon támogatott megújuló energiaforrásokat kiegészítő tárolási technológiákat. Ezen kézirat egy új, hazánkban jelenleg felfutás alatt lévő technológiának, az energiatárolásnak az egyik alternatívájára kívánja felhívni a figyelmet. A Power-to-Gas technológia alkalmazásában rejülő széleskörű lehetőségek és a műszaki megoldások folyamatos fejlődése miatt célszerű a magyarországi alkalmazás lehetőségeit áttekinteni.

Megújuló energiaforrások helyzete Magyarországon

Magyarországon a megújuló energiához kapcsolódó fogalmak jogszabályi környezetben való tisztázására először a 2000-es évek legelején került sor. Az európai uniós értékrendet szem előtt tartva, már a 2004-es csatlakozásra készülve, a 2001. évi villamosenergia-törvényben említésre került, hogy a környezetvédelem, valamint a felhasznált energiaforrások bővítése érdekében a megújuló energiaforrások felhasználását elő kell segíteni [1]. Az ezt követő években az európai uniós környezetvédelmi célkitűzéseket követve egyre több megújuló energiaforrásra épülő energetikai megoldás jött létre hazánkban is. A megújuló energiaforrások használatára annak fajtájától, illetve hazánk energiagazdálkodási stratégiájában betöltendő szerepétől függően, a támogatási rendszerek nyújthatnak elsősorban ösztönzést [2]. Magyarország helyzetének értékelése szempontjából fontos áttekinteni, hogy milyen célra, illetve milyen mértékben, kerülnek felhasználásra a megújuló energiaforrások.

Az energiaszükséglet kielégítése egy folyamatosan megoldást követelő feladat hazánkban is. Az energiahasználatot tekintve a 2010-es évek elején jelentősen megnövekedett a megújuló energiaforrások részaránya (1. ábra). Úgy tűnik azonban, hogy a 2013-as csúcstérteket követően évről évre kismértékben csökken a bruttó végső energiafogyasztásban elért részesedése. Természetesen ennek alakulásában nagyon sok faktor játszhatott szerepet, az egyes megújuló energiaforrások kihasználása eltérő mértékben változott. Többek között az éppen aktuális hazai és uniós jogszabályi

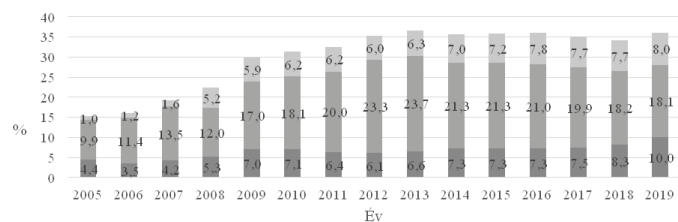
környezet, a szakpolitika álláspontja, és a piaci trendek is mind hozzájárulnak a megújuló energiaforrások felhasználásának alakulásához (pl.: a szilárd biomassza felhasználását nagyban befolyásolta a lakossági földgázhasználat; a háztartási méretű kiserőművek szabályozási támogatásának köszönhetően 2008-at követően jelentősen megnövekedett számuk és beépített teljesítőképességük [3]).



1. ábra. A megújuló energiaforrásokból előállított energia felhasználásának részaránya a bruttó végső energiafogyasztásban, Magyarország, 2005-2019, % Forrás: [4] alapján saját szerkesztés

Az elmúlt 15 évben jellemzően fűtési és hűtési célra használták Magyarországon a megújuló energiaforrásból nyert energiát. Ebben az időszakban a megújuló energiaforrásból előállított fűtési és hűtési célú energia részaránya a bruttó fűtési és hűtési célú energiafogyasztáson belül megkétszereződött (a 2010-es évek elején már több, mint 20%-ot ért el) (2. ábra). Ugyanakkor a megújuló energiaforrásból előállított villamos energia részaránya a bruttó végső villamosenergia-fogyasztáson belül szintén növekedett az elmúlt években. A 2008-as jogszabályi változtatásokat követő 10 évben majdnem megduplázódott a megújuló energia alapú villamos energia részaránya (5,3% 2008-ban, 10% 2019-ben). Bár Magyarországon támogatott a megújuló energiaforrások használata, még a legdinamikusabban terjedő megújuló energiaforrás, a napenergia is igen költségesnek számított a 2010-es évek elején [5]. Így azok előretörése igen korlátozott volt. Bár a 2008-ban megváltozott támogatási rendszernek megfelelően, a kötelező villamos energia átvételi ár (KÁT rendszer) a megújuló energia termelő erőmű névleges teljesítménye, a szerződési időpontja, a technológiája és a zónaidő alapján meghatározásra került [6]. Ezen árak a legtöbb európai országhoz képest jelentősen, három-öttször alacsonyabbak voltak [5]. Így tehát a villamosenergia-termelést igen költséges volt az eredeti KÁT rendszerben megújuló energiaforrásokra alapozni. A 2017-ben bevezetett METÁR rendszer további részarány növekedéssel járhat, amennyiben a rendszer beváltja a hozzáfűzött reményeket. Hasonló tendenciák mutatkoznak a megújuló energiaforrásokból előállított energia közlekedésben való felhasználásának részaránya terén is. 2008-tól a közlekedési célú felhasználásban is jelen-

tősen elkezdett emelkedni a megújuló energiaforrások használata. Míg 2005-ben a közlekedésben felhasznált energiának mindössze 1%-a származott megújuló energiaforrásból, ez az érték 2019-re már elérte a 8%-ot. Ennek háttérében az állhat, hogy az ország környezetvédelmi törekvéseiben is kiemelt szerepet kapott a megújuló energia közlekedési célú felhasználása [7,8].

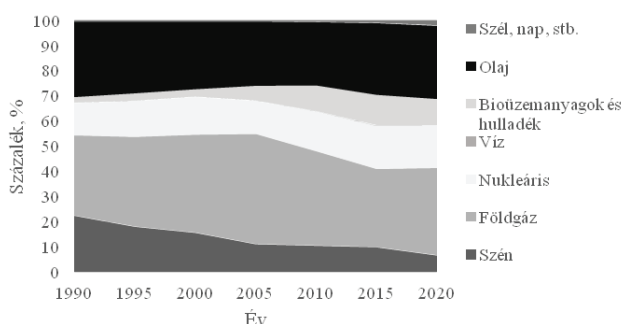


■ A megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia részaránya a bruttó végső villamosenergia-fogyasztáson belül
 ■ A megújuló energiaforrásokból előállított energia fűtési és hűtési célú bruttó fogyasztásának a részaránya a fűtésben és hűtésben
 ■ A megújuló energiaforrásokból előállított energia felhasználásának részaránya a közlekedésben

2. ábra. Megújuló energiaforrások felhasználásának részaránya a bruttó végső energia fogyasztáson belül Magyarországon, 2005-2019 Forrás: [4] alapján saját szerkesztés

Továbbá fontos tényező az ország energiagazdálkodásában, hogy jelentős az energia importfüggősége. A Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) adatai alapján 2019-ben hazánk 11 677 GWh villamos energiát szerzett be külföldről, amely több mint negyede az összes felhasználásnak (46 293GWh). Az elmúlt öt évben az ország teljes villamosenergia-felhasználásnak körülbelül 24-30%-át tette ki az import. Mindebből következik, hogy célszerű lehet az energiabiztonság szempontjából mérlegelni a hazai termelés jelentősebb kiaknázásának lehetőségeit, azon belül is a megújuló energiaforrásokat.

Habár a megújuló energiaforrások részaránya 2,3%-ról 12,8%-ra változott az elmúlt mintegy 30 évben, azonban ez az emelkedés az EU-28 átlagánál jóval alacsonyabb mértékű (1990- ben 4,6%, 2019-ben 16,2%) (3. ábra) [9]. Míg a víz energia mindösszesen 0,1%-át tette ki 2020-ban Magyarország teljes energiaellátásának a megújuló energiaforrások közül legnagyobb részarányt a bioüzemanyagok, a szennyvíz, és a hulladék felhasználása képviselt (2020-ban 10,7%).



3. ábra. Magyarország teljes energiaellátása források szerint 1990-2020 Forrás: [10] alapján saját szerkesztés

Biogáz termelés Magyarországon

Magyarországon az első biogáztermelésre vonatkozó kísérletek elsősorban az állattenyésztéshez, azon belül is a trágyahasznosításhoz kapcsolódtak. Az első olyan kísérletek hazánkban, amely

a trágyahasznosítás anaerob formájára fókuszáltak 1950-ben kezdődtek. Azonban a kezdeti időben létesített biogázüzemek sok esetben ma már nem működnek. A felszámolások okai között gyakran szerepeltek a nyersanyagok elérésének megszűnése és/vagy a megtermelt gáz hasznosítási lehetőségeinek beszűkülése. A biogázüzemek gazdaságossága attól függ, hogy a megtermelt gázt hogyan tudják hasznosítani. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a hosszútávú fennmaradáshoz fontos, hogy többféle és hosszútávú biztos fogyasztóbázisra alapuljon az üzem. Mindemellett az alapanyag elérhetősége is kardinális kérdés. Lényeges továbbá, hogy mind a mennyiség, mind pedig a minőség konzisztens maradjon. Egy biogáz üzem működése alapvetően akkor megfelelő, ha az alapanyag-ellátás, a megtermelt energia hasznosítása és a biotrágya felhasználása integrálódik a környezetbe [11].

2015-ben körülbelül 70 üzemben állítottak elő biogázt Magyarországon [12], Ezen üzemek nagyrésze az agrárszektorban működött, mintegy 30 MW kapacitással [13]. A többi üzem nagyrésze a hulladékszektorban, és a szennyvíz szektorban volt megtalálható. Gyakran használt technológiák az anaerob rothasztás és az iszap víztelenítés. 2015-ben a teljes kapacitás körülbelül 40 MW volt. Ebben az időszakban két biometán üzem működött hazánkban [11,14]. Jelenleg ugyan nem áll rendelkezésre részletes nyilvántartás az üzemek számáról, de a nyilvánosan elérhető információk alapján a biogáz üzemek száma 2021-ben meghaladta az 50-et.

A megtermelt biogáz tisztítást és kéntelenítést követően többféle módon felhasználható:

- Gázégőkkel: hőtermelésre;
- Gázmotorokkal: villamos energia és hőtermelésére;
- Gázhálózatba való betáplálásra: tisztítás és metántartalom növelését követően;
- Üzemanyagként: tisztítás és metántartalom növelése után, buszok és egyéb járművek hajtására [11].

Ezen lehetőségek közül a földgázhálózat nyújtotta lehetőségeket érdemes kiemelni a Power-to-Gas (P2G) technológia kontextusában. A P2G üzem biztosíthatja a biogázüzem által termelt gáz metántartalmának kellő növelését, hogy az alkalmas legyen a hálózatba való betáplálásra. Hazánkban jelenleg egy helyen történik a biometán közvetlen betáplálása a földgázhálózatba (Kaposváron). A megfelelő fűtőérték elérése érdekében propánt adagolnak a tisztított biometánhoz, majd szagosítják. A tisztított biometán abban az esetben táplálható a hálózatban, ha a jogszabály és szolgáltató (Kaposvár esetén E.ON Közép-dunántúli Gázhálózati Zrt.) által előírt minőségi és mennyiségi paramétereknek megfelel. A kaposvári üzem az elosztó rendszerbe táplált gáz minőségi jellemzőit, a gázösszetételt folyamatos műszeres mérésekkel (órai és napi átlagértékek) és akkreditált laboratóriumban végzett gázminta elemzésekkel dokumentálja [15,16].

A biogáz alapú bruttó villamosenergia-termelés az elmúlt években Magyarországon körülbelül 20-30 GWh volt. A termelés mértéke az egyes éveket, illetve hónapokat tekintve nem mutatott igen jelentős eltérést. Hazánkban jellemzően a megtermelt biogáz túlnyomó többsége átalakításra kerül. A fennmaradó mennyiséget, azaz a biogázt közvetlenül, elsősorban az ipar hasznosítja. A 2010-es évek derekán az átalakításra történő bevittel még teljes egészében villamos energiát és hőt állítottak elő. Azonban 2017-től már a biogáz földgázhoz történő bekeverése is megjelent az átalakítási szektorban (az energia formájának megváltoztatásával foglalkozó szektor) (1. táblázat), amelynek eredményeképp a minőségi felté-

1. táblázat. A biogáz felhasználása Magyarországon 2014-2020

Biogáz (TJ)		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Átalakítással történő bevétel		2113	2259	2536	2798	2730	2668	2596
	Villamosenergia- és hőtermelés	2113	2259	2536	2612	2546	2466	2396
	Földgázhoz történő bekeverésre	0	0	0	186	184	202	200
Átalakítás kihozatal		0	0	0	0	0	0	0
	Villamosenergia- és hőtermelés	0	0	0	0	0	0	0
	Földgázhoz kevert	0	0	0	0	0	0	0
Végső energiacélú felhasználás		821	536	557	760	592	510	549
	Ipar	735	402	378	589	441	367	394
	Közlekedés	0	0	0	0	0	0	0
	Egyéb ágazatok	86	134	179	171	151	143	155
Végső nem-energetikai célú felhasználás		0	0	0	0	0	0	0

Forrás: [4] alapján saját szerkesztés

teleknek megfelelő biogáz [17] a földgázzal együtt felhasználásra vagy tárolásra kerül. Ugyanakkor 2014 és 2020 között a Magyar Energetika és Közmű- szabályozási Hivatal (MEKH) nem jegyzett fel a biogáz átalakításából kinyert tételt, a bevétel mértéke évről évre kismértékben növekszik. Ez a bekeverési mennyiség, bár elenyésző az ország teljes primer földgáztermeléséhez képest, jól mutatja, hogy a földgázhoz történő bekeverésnek a gyakorlatban sincsenek jelentősebb korlátai.

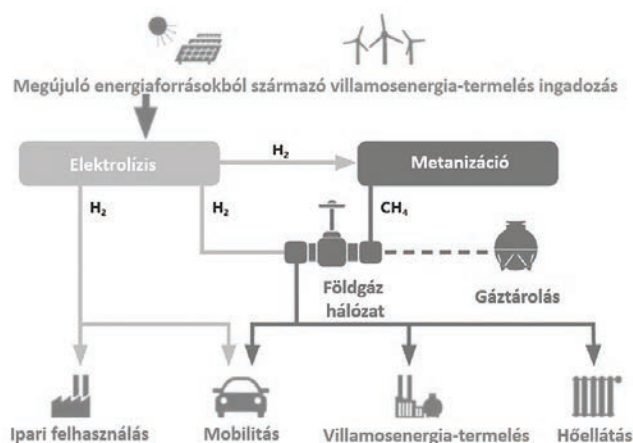
Hazánk természeti adottságaiból kifolyólag jelentős mennyiségű alapanyag áll rendelkezésre a biogáz-termelés számára. Azonban a hazai biogáz-termelés még jelentős mértékben tovább fejleszthető, viszont az a földgázfüggőség érdemi mértékben való kiváltására nem alkalmas [18]. Viszont növelheti az energia ellátásbiztonságot, környezeti szempontból fenntartható alternatívát nyújthat, és akár elősegítheti a megújuló energiaforrások integrálását az ellátórendszerbe, például a P2G technológia segítségével.

Power-to-Gas technológia

Az új, innovatív lehetőségek feltárása és gyakorlati alkalmazása egyre sürgetőbb cél, hiszen hazánk elkötelezte magát, hogy 2030-ra a megújuló energiafelhasználás aránya a bruttó végső energia-felhasználáson belül minimum 21%-ra nő [2]. A megújuló energiaforrások villamosenergia-termelésének időbeli és térbeli ingadozásai a nagy kapacitású elosztórendszereknek, és az időszakos tárolási lehetőségeknek feltárását igénylik. Ebből kifolyólag előtérbe kerülnek a P2G technológiához hasonló „zöld” megoldások. Alapvetően a technológia használatának szükségessége abban rejlik, hogy a különböző energia szektorokban széles körben használatos megújuló energiaforrások egy része nem biztosít folyamatos, konzisztens energiaellátást (pl. időjárásfüggő megújuló energiaforrások) [19–22].

A Power-to-X (*Power-to-Everything*, azaz villamos energia felhasználásával mindenféle üzemanyag és/vagy kémiai alapanyag gyártása) koncepciók elsősorban gáznemű kémiai energiahordozókat hoznak létre a megújuló energiaforrásokból származó, a villamosenergia-rendszer számára felesleges energia alkalmazásával. A P2G egy olyan energiaátalakító eljárás, mely során villamos energia szintetikus metánná való átalakítása történik. Ilyen módon

lehetővé válik a villamos energia hosszútávú tárolása. Az átalakítási láncok első lépése a hidrogéngáz előállítás, amely elektrolízissel történik (*Power-to-Hydrogen*, P2H). Ez a hidrogén felhasználható végső energiahordozóként, vagy átalakítható. A hidrogén hasznosítása azonban jelentős korlátokba ütközik a jelenlegi infrastrukturális adottságok mellett, ugyanis a biztonságossági feltételek miatt jellemzően maximum 10 vol%-ban lehet injektálni a szabványos földgázhálózatba hidrogént (Magyarországon esetén 2 vol% a kitűzött cél 2030-ig [23]), míg tiszta állapotban való tárolása és felhasználása ipari méretekben egyelőre nehézkes. Az eljárás második lépése, a metanizáció (*Power-to-Methane*, P2M) opcionális része a folyamatnak. A metanizáció során a hidrogén felhasználásával biometán képződik, melyet szintén lehetőség van tárolni, felhasználni (pl. biogáz dúsítás) vagy értékesíteni. A metanizációhoz szén-dioxid szükséges, amely így a légkör szén-dioxid tartalmának csökkenését eredményezhetné [24]. A biometán/szintetikus metán szinte korlátlan mennyiségben injektálható a szabványos földgázrendszerbe a földgázzal megegyező minőségi tulajdonságai miatt. Ebből adódóan a földgázzal működő gázmotorok, gázkazánok stb. is minden módosítás nélkül képesek a felhasználására.



4. ábra. A P2G folyamata előállítástól felhasználásig

Forrás: [25] alapján saját szerkesztés

A P2G segítségével előállított szintetikus metán felhasználható a szállítmányozásban, háztartásokban, iparban, de akár az energiaellátás rugalmasságának elősegítésében is. Emellett kiváló lehetőséget nyújthat megújuló energiaforrásokra alapuló üzemek hatékony működésének biztosításában is. Egy biogázon alapuló P2G üzem a magyarországi kiterjedt és fejlett földgázhálózatba való betáplálás, valamint a villamos- és hőenergia helybeni felhasználása szempontjából is ideális alternatívát jelenthet, továbbá pozitívan hat a már létező biogázüzemek hatékonyságának környezetbarát növelésére. A biogázüzemmel összekapcsolt P2M üzem igen jelentős előnye (a P2H-nel szemben), hogy a biogázüzemből származó CO₂ a metanizáció során felhasználható. A megoldás támogatása érdekében célszerű lenne, ha a szabályozás egyértelműen nyilatkozna róla, hogy az így kapott szintetikus metán teljes mértékben megújuló energiának számít-e.

A technológia jelenleg még csak felfutási fázisban van [26]. Az elmúlt években egyre több kutatás és kísérlet jött létre világszerte a technológiában rejlő rugalmassági és környezetvédelmi előnyök kihasználása érdekében. Összességében a P2G technológia hozzájárulhat a hatékonyabb és rugalmasabb energiarendszerek fejlesztéséhez. Ehhez azonban nem elegendő a technológia fejlesztése (elektrolízáló, tárolótartályok, metanizáló üzem paramétereinek javítása), elengedhetetlen a megfelelő, támogató gazdasági és politikai háttér kialakítása is [19,27].

Biometán betáplálása a földgázhálózatba

Mint az korábban említésre került (2. ábra), Magyarországon a megújuló energia felhasználása elsősorban fűtési és hűtési céllal történik. Az ország kiváló infrastrukturális feltételekkel rendelkezik a gáz elosztásához, illetve szállítmányozásához. A teljes magyarországi távvezeték hálózat hossza 5874 km, amely biztosítja a földgáz szállítását a hazai termelők, a föld alatti gáztárolók, a határpontok, a gázelosztó társaságok, illetve az ipari fogyasztók átvételi pontjai között. Jelenleg összesen hat határponton lehetséges a gázszállítás határon túlra. 2022 év elején négy határponton érkezett hazánkba import földgáz (VIP Bereg, Kiskundorozsma 2, Drávaszerdahely, Mosonmagyaróvár), és két ponton határon kívülre történt gáz szállítás (Csanádpalota, Kiskundorozsma). A vezetékek korrózió elleni védelemmel vannak ellátva. Mindemellett az FGSZ Földgázszállító Zrt. nyilatkozata alapján a 2021-es városföldi gázközpont fejlesztésének köszönhetően lehetővé vált a földgázt bármely irányból fogadni (Horvátországból, Romániából, Ukrajnából, Ausztriából, Szlovákiából vagy Szerbiából) és továbbítani is [28–30]. A hálózat és akár a megújuló energiaforrások adta lehetőségek kihasználásával lehetővé válik nem csak az ország, hanem az egész közép-európai régió energiabiztonságának növelése.

Magyarország szempontjából ez egy jelentős potenciál, hiszen a földgáz import mértéke számottevő (2019-ben 652 306 TJ, amely több mint 10-szerese volt a primer energiatermelésnek). Ebből kifolyólag több szempontból is előnyös lehet a földgázhálózatba való betáplálás opcióját szem előtt tartani. Egyrészt növelhető az energia ellátásbiztonsága, a földgáz import csökkenésével, másrészt a már létező földgázhálózat infrastruktúrája tökéletesen alkalmas a karbonmentes termelők energia-rendszerbeli integrálására. Harmadrészt pedig a már létező infrastruktúra adta lehetőséget ki lehet aknázni. Az előállított szintetikus metán ugyanis a földgázzal megegyező minőségi tulajdonságai miatt szinte korlátlan mennyiségben injektálható a szabványos földgázrendszerbe, a hidrogénnel ellentétben, amely komoly technikai



5. ábra. Magyarország földgázszállító hálózata, 2019 Forrás: [29]

korlátokkal táplálható csak be [17]. A földgáz használatára tervezett berendezések beállításai megváltoztatása nélkül is képesek felhasználni a biometánt [31]. Nem utolsó sorban pedig a megújuló energián alapuló biometán betáplálása érdemben javítja az üvegházhatású földgázhálózat kibocsátási mutatóját. Az ilyen típusú megoldások (MIGG- synthetic methane injection into the gas grid, azaz biometán betáplálása a gázhálózatba) élenjárója Németország. Európában a legtöbb gázfejlesztő és betápláló üzem, illetve a legnagyobb biometán termelő kapacitás Németországban van. Természetesen ehhez szükséges volt az, hogy az ország egyértelmű jogi iránymutatásokat és támogatási mechanizmusokat vezetett be a biometánra vonatkozóan. Többek között megtörtént a biogázüzemek gázhálózathoz való hozzáférése vonatkozó egyedi előírások, illetve a műszaki szabványok és technológiai szabályok egyértelmű lefektetése [31]. Ezáltal hazánkban, Németországhoz hasonlóan, a szintetikus és biometánban rejlő potenciál kiaknázásához szükséges, hogy egyértelmű szabályozás kerüljön kialakításra [22].

Következtetések

Magyarországon a fenntarthatóbb energiagazdálkodás érdekében szükséges, hogy a Nemzeti Energiestratégiában megfogalmazott célkitűzések oly módon kerüljenek eléérésre, amely az ország adottságainak szempontjából a legracionálisabb alternatívát kínálja. A fotovillamos rendszerekre épülő technológiai megoldások rohamosan fejlődnek, ezeket azonban időjárás függőségük miatt többnyire szükséges lenne kiegészíteni energiátároló rendszerekkel. Ehhez a kihíváshoz a P2G technológia egy lehetséges alternatívát jelent.

A hazai biogáz-termelés a P2G eljárással kiegészülve még jelentős mértékben tovább fejleszthető, az így keletkező bio/szintetikus metán a hazai földgázhálózatba tisztítás után betáplálható. A nagykanizsai szennyvíztelep adatai alapján elsősorban a kén eltávolítása szükséges a keletkező metánból. P2G folyamattal a hazai földgázfogyasztás töredék részét lehet csak előállítani, mindemellett viszont növelheti az energia ellátásbiztonságát, környezeti szempontból fenntartható alternatívát nyújthat, és akár elősegítheti az időjárásfüggő megújuló energiaforrások rendszerbe való integrálását. A biogázüzemmel összekapcsolt P2G üzem jelentős előnye, hogy a biogázüzemből származó CO₂ a metanizáció során felhasználható. A megoldás támogatása érdekében célszerű lenne, ha a szabályozás egyértelműen nyilatkozna róla, hogy az így kapott szintetikus metán teljes mértékben megújuló energiának számít-e, tehát biometánnak, vagy csak szintetikus metánnak minősül. Ösz-

szességében tehát a P2G technológia hozzájárulhat hatékonyabb és rugalmasabb energiarendszerek fejlesztéséhez, ugyanis alkalmas a rendszerben pillanatnyilag felesleges energia hosszú távú eltárolására/átalakítására (nyáron felesleges villamos energia télen szükséges fűtési célú metánná való alakítására, mely tárolására a meglévő hazai infrastruktúra átalakítás nélkül alkalmas). Ehhez azonban nem elegendő a technológia fejlesztése (elektrolizáló, tárolótartályok, metanizáló üzem paramétereinek javítása), elengedhetetlen a megfelelő, támogató gazdasági és politikai háttér kialakítása is.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció elkészítését a 2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00006 és a 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 projektek támogatták.

Irodalom

- Országgyűlés. 2001. évi CX. törvény a villamos energiáról; 2001;
- NEMZETI ENERGIASZTRATÉGIA 2030.
- Jelentés - A megújuló energiaforrások 2017-2018. évi felhasználásáról Magyarországon (tagállami jelentéstétel a 2009/28//EK irányelv 18. és 22. cikke alapján); Budapest, 2019;
- Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal HIVATALOS STATISZTIKA Available online: <http://www.mekh.hu/hivatalos-statisztika> (accessed on Jan 7, 2022).
- Council of European Energy Regulators ASBL Status Review of Renewable and Energy Efficiency Support Schemes in Europe; Bruxelles, 2013;
- 389/2007. (XII. 23.) Korm. rendelet a megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt villamos energia, valamint a kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételéről és átvételi áráról; Hungarian Government;
2010. évi CXVII. törvény a megújuló energia közlekedési célú felhasználásának előmozdításáról és a közlekedésben felhasznált energia üvegházhatású gázkibocsátásának csökkentéséről - Hatályos Jogszabályok Gyűjteménye; Hungarian Parliament, 2010;
- Ministry of Innovation and Technology National energy and climate plan- Hungary; 2019;
- IEA Total energy supply (TES) by source, European Union - 28 1990-2019 Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=EU28&fuel=Energy supply&indicator=TESbySource> (accessed on Jan 4, 2022).
- World Energy Statistics and Balances - Data product - IEA Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances> (accessed on Jan 5, 2022).
- Hajdu, J. BIOGÁZÜZEMEK MŰKÖDÉSE ÉS BIOGÁZ ÜZEMI TECHNOLÓGIÁK; Tóth, L., Ed.; Szent István Egyetemi Kiadó: Gödöllő, 2009; ISBN 9789632691572.
- Szunyog, I. BIOMETÁN HASZNOSÍTÁS EURÓPÁBAN ÉS MAGYARORSZÁGON . Műszaki Földtudományi Közlemények 2015, 85, 181–190.
- Bai, A. BIOGÁZ ELŐÁLLÍTÁSÁNAK TECHNOLÓGIÁJA; Debreceni Egyetem. Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, 2013;
- Möller, L. Expanding biogas production in Germany and Hungary: Good prospects for small scale farms? . In Structural Change in Europe's Rural Regions – Farm Livelihoods Between Subsistence Orientation, Modernization and Non-farm Diversification. ; 2009; Vol. 49, pp. 113–133.
- FGSZ FÖLDGÁZSZÁLLÍTÓ ZÁRTKÖRŰEN MŰKÖDŐ RÉSZVÉNYTÁRSASÁG Egyedi szerződéses feltételek. 2021, 1–18.
- Szendefy, J. Biogáz üzemi tapasztalatok földgázhálózati betáplálásnál; 2018;
2008. évi XL. törvény a földgázellátásról ; 2008;
- Biológia alapú, energetika célú gáztermelés lehetséges irányvonalai Magyarországon Available online: <https://mvmp.hu/HU/Szolgáltatások/Villamos-energia/Erdekessegek/Biológiai apuenergetikacelugaztermeleslehetesegiranyvonalaiMagyar orszagon> (accessed on Jul 13, 2021).
- Wulf, C.; Linßen, J.; Zapp, P. Review of Power-to-Gas Projects in Europe. Energy Procedia 2018, 155, 367–378, doi:10.1016/J.EGYPRO.2018.11.041.
- Lehner, M.; Tichler, R.; Steinmüller, H.; Koppe, M. The Power-to-Gas Concept. 2014, 7–17, doi:10.1007/978-3-319-03995-4_2.
- Götz, M.; Lefebvre, J.; Mörs, F.; McDaniel Koch, A.; Graf, F.; Bajohr, S.; Reimert, R.; Kolb, T. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renew. Energy 2016, 85, 1371–1390, doi:10.1016/J.RENENE.2015.07.066.
- Lewandowska-Bernat, A.; Desideri, U. Opportunities of Power-to-Gas technology. Energy Procedia 2017, 105, 4569–4574, doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.03.982.
- HUNGARY'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY - STRATEGY FOR THE INTRODUCTION OF CLEAN HYDROGEN AND HYDROGEN TECHNOLOGIES TO THE DOMESTIC MARKET AND FOR ESTABLISHING BACKGROUND INFRASTRUCTURE FOR THE HYDROGEN INDUSTRY; Budapest, 2021;
- Bagi, Z.; Ács, N.; Böjti, T.; Kakuk, B.; Rákhely, G.; Strang, O.; Szuhaj, M.; Wirth, R.; Kovács, K.L. Biomethane: The energy storage, platform chemical and greenhouse gas mitigation target. Anaerobe 2017, 46, 13–22, doi:10.1016/J.ANAEROBE.2017.03.001.
- The inter-sectoral couplings “Power to Gas” and “Power to Heat”: what role in the energy transition? (1st part) | Encyclopédie de l'énergie Available online: <https://www.encyclopedie-energie.org/en/the-inter-sectoral-couplings-power-to-gas-and-power-to-heat-energy-transition/> (accessed on Jul 12, 2021).
- Ghaib, K.; Ben-Fares, F.Z. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 81, 433–446, doi:10.1016/J.RSER.2017.08.004.
- Quarton, C.J.; Samsatli, S. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 98, 302–316, doi:10.1016/J.RSER.2018.09.007.
- FGSZ - Távfűtők Available online: <https://fgsz.hu/a-foldgazrol/a-foldgazszallitasrol/tavfuetok.html> (accessed on Jan 7, 2022).
- FGSZ - Magyarország földgázszállító vezetéseinek fejlődése Available online: <https://fgsz.hu/vallalatunk/cegtortenet> (accessed on Jan 7, 2022).
- Horváth, L. Terítéken a szlovéniai interkonnektor. Világgazdaság 2021.
- Urban, W. Biomethane injection into natural gas networks. Biogas Handb. Sci. Prod. Appl. 2013, 378–403, doi:10.1533/9780857097415.3.378.

Az alga alapú power-to-gas üzemek fejlesztésének stratégiai szempontjai a körforgásos gazdaságban

Zavarkó Máté

*doktorjelölt, Budapesti Corvinus Egyetem, Vezetés és Szervezés Tanszék
üzletfejlesztési igazgató, Power-to-Gas Hungary Kft.*

A körforgásos gazdaság nemzetközi szakirodalmának egyik fontos témája a bioüzemanyagok termelésére és a dekarbonizációra is alkalmas algatermesztés és -hasznosítás. Mivel a power-to-gas (P2G) technológia hasonló előnyökkel, de eltérő működési mechanizmusokkal rendelkezik, a legújabb kutatások már az alga alapú folyamatok és a P2G rendszerek integrációjával foglalkoznak. Jelen tanulmány azokra a stratégiai szempontokra fókuszál, amelyek az alga alapú P2G üzemek fejlesztését befolyásolhatják a körkörös gazdaságon belül, de a nemzetközi szakirodalomban is még csak érintőlegesen jelentek meg. Átfogó szakirodalmi áttekintés alapján azonosításra kerültek az alga alapú biogáz- és biometán-termelés főbb stratégiai lehetőségei, illetve egy alga alapú P2G üzemhez kapcsolódó technológiai folyamatok üzleti vetületei (megújuló villamosenergia-termelés, biogáztermelés, szennyvíztisztítás). A nemzetközi kutatások fő iránya az alga alapú rendszerek gazdasági és környezeti hatékonyságának fejlesztése a kereskedelmi léptékű hasznosítás érdekében. Az említett technológiai folyamatokkal történő integrált és stratégiai szintű elemzés azonban még kutatási résnek számít, így ez az alga alapú P2G rendszerek további elméleti és empirikus kutatásának tárgya lehet.

*

One of the main topics of the circular economy literature is algae cultivation and utilization which can be suitable for biofuel production and decarbonization. As the power-to-gas (P2G) technology has similar benefits but different mechanisms, novel research deals with the integration of algae-based processes and P2G systems. This study focuses on the algae-based P2G plant development in the circular economy considering strategic aspects that are mainly peripheral in the literature. Based on a comprehensive literature review, strategic opportunities for algae-based biogas- and biomethane production were identified, moreover, business aspects of technological processes were analyzed which can be related to an algae-based P2G plant (solar park, biogas production, wastewater treatment). Results showed that the main direction of international research is the development of the economic and environmental efficiency of algae-based systems to support commercial-scale implementation. Nevertheless, integrated and strategic analysis of the related technological processes is a research gap that can be the topic of future theoretical and empirical research on algae-based P2G systems.

A power-to-gas (P2G) technológia mint a jövő energiaszektorának meghatározó megoldása [1, 2, 3] a körforgásos gazdaságban is központi szerepet tölthet be, elsősorban a megújuló villamosenergia-tárolás, a biometán-előállítás és a dekarbonizáció lehetősége miatt

[4, 5, 6]. Ezen a területen egyre nagyobb figyelmet kap a makro- és mikroalga-termelés és -hasznosítás kombinálása is a P2G technológiákkal. Ennek oka, hogy mindkét algatípus alapanyagként szolgálhat a biogáztermeléshez, és a biogáz pedig P2G technológiával biometánná alakítható. Továbbá, a mikroalgák a képesek a fotoszintetikus biogáz-feljavításra is (azaz általuk szintén biometán termelhető) [5, 7]. Külön figyelmet kap a szakirodalomban a bioüzemanyagok előállítása az algák felhasználásával [8, 9], amelynek egyik lehetősége a megtermelt biometán cseppfolyósítása LNG-vé [10].

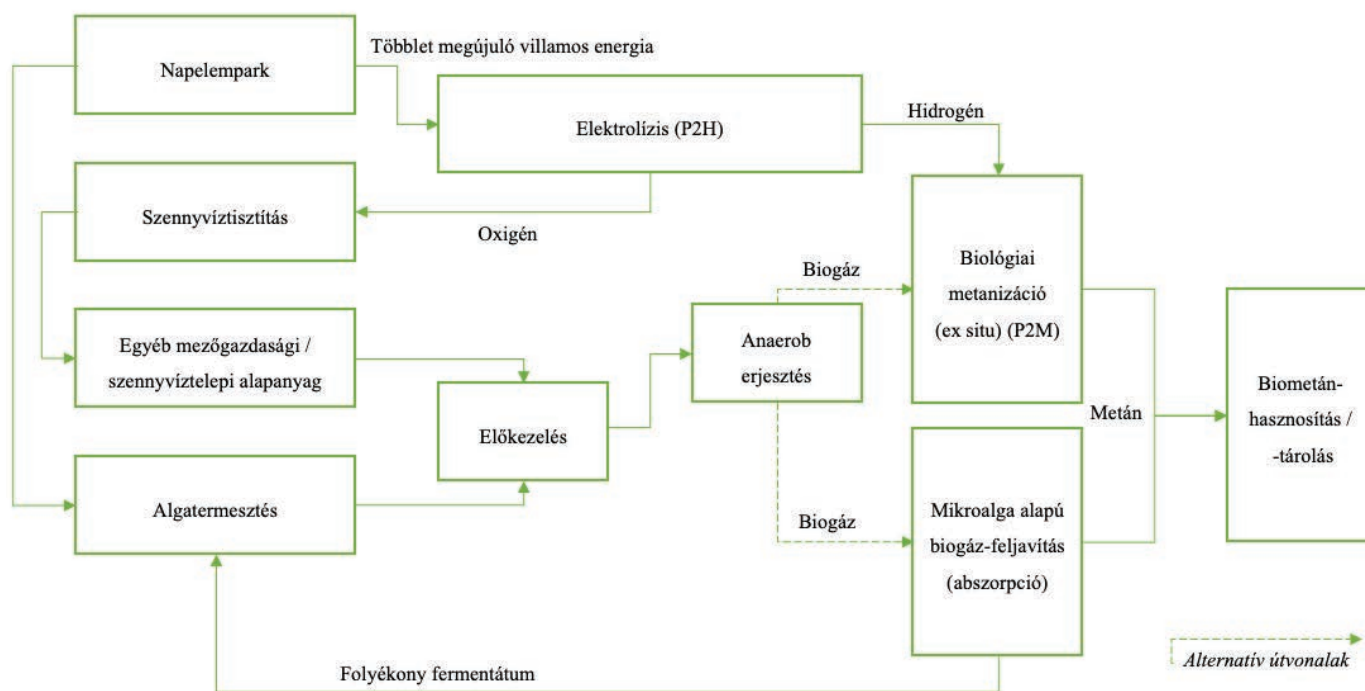
Mivel a biológiai metanizációs power-to-gas technológia már kereskedelmi léptékben is implementálásra került [11], illetve a power-to-gas technológiára vonatkozóan már számos műszaki, és műszaki-gazdasági jellegű tanulmány született [12, 13, 14, 15], érdemes továbblépni a P2G stratégiai, üzleti szempontjai felé az algahasznosítás lehetőségeit is figyelembe véve.

A korábbi szakirodalom alapján azonban a P2G a körkörös gazdaságon belül további technológiai folyamatokhoz is kapcsolódik, különösen

- a) a napelemparkokhoz, hiszen a többlet megújuló villamosenergia-termelés felvétele és a zöld hidrogén termelése a P2G rendszerek alapja [1], illetve a P2G rendszerek energiatárolási lehetőséget jelentenek [16, 17], amely a hálózati kiegyensúlyozási igény [18] miatt is fontos lehet,
- b) a szennyvíztisztítási folyamatokhoz, amely hatékonyságát az elektrolízis melléktermékeként keletkező oxigén növelni tudja [12] [19],
- c) és akár a szennyvíztisztító telepeknél lévő, akár a mezőgazdasági biogáztermeléshez, amelyek a metanizációs folyamathoz biztosítják a biogázt mint szén-dioxid forrást [20].

E folyamatokat fejlesztő és üzemeltető energetikai szereplők, például a biogáz üzemek vagy szennyvíztisztító telepek működtetői a mindennapokban is szembesülnek a külső környezet változásából fakadó új tényezőkkel (dekarbonizáció nyomása, körkörös gazdaság lehetősége, gazdasági, környezeti és társadalmi teljesítmény javításának igénye [21] [22] [23] [24]). E tényezőkre e szereplőknek valamilyen módon reagálniuk kell [25], például saját technológiai, infrastrukturális képességeik fejlesztésével [26, 27], hogy szervezeti teljesítményüket fenntartsák vagy javítsák [28]. Mivel e fejlesztésre műszaki lehetőséget jelent az alga alapú P2G üzemek létesítése, az ipari léptékű alkalmazáshoz szükséges az összekapcsolódó technológiai folyamatok stratégiai jellegű kutatása is.

Jelen tanulmány célja, hogy nemzetközi szakirodalmi áttekintés alapján ismertesse azon legújabb kutatási eredményeket, amelyek az algahasznosítás területén megalapozzák a P2G stratégiai lehetőségeit, illetve előkészítse az alga alapú P2G üzemek fejlesztését a kapcsolódó folyamatok (így a megújuló villamosenergia-termelés, szennyvíztisztítás, biogáztermelés) stratégiai, üzleti jellegű kutatási eredményeinek feltárásával.



1. ábra. A kutatás terjedelmébe tartozó, alga alapú P2G és biometán-termelési lehetőségek ([29], [7], [30], [4], [31] és [5] alapján saját szerkesztés)

Anyagok és módszerek

A tanulmány kiindulási kutatási keretrendszerét – a bevezetésben említett lehetőségek mentén – az 1. sz. ábra mutatja.

Fontos, hogy az ábra nem egy preferált technológiai rendszert mutat, hanem a kutatás terjedelmébe tartozó technológiai lehetőségeket vázolja fel, amelyek a stratégiai szempontú elemzést irányították:

- A napelemparkból származó energia felhasználható az algák termesztésére és zöld hidrogén előállítására [30].
- A zöld hidrogén előállítása során keletkező oxigén melléktermék felhasználható a szennyvíztisztítási folyamatban [4].
- Az algák önmagukban vagy más alapanyagokkal együtt feldolgozva a biogáztermelésre hasznosíthatók [31, 5].
- A biogáz
 - vagy egy ex-situ biometanizációs reaktorba vezethető, ahol a zöld hidrogén jelenlétében megvalósul a biogáz szén-dioxid konverziója,
 - vagy egy mikro-alga rendszerbe vezethető, ahol egy biogáz-feljavító abszorpciós oszlopban az algák megkötik a biogáz szén-dioxid-tartalmát.

Wall és társai [5] e két megoldás együttes alkalmazását is felvázolták, miszerint nappal az alga alapú biogáz-feljavítás, éjjel az ex-situ biometanizáció működhetne. Mindkét folyamat végterméke a biometán, amely gázmotorban elégethető, a földgázhálózatba táplálható vagy további konverziós lépésekkel üzemanyagként hasznosítható.

A szakirodalom feldolgozása két fázisra oszlott. Az első fázis az alga alapú biogáz- és biometán-termelési lehetőségek és P2G rendszerek stratégiai szempontjaira fókuszált. A második fázisban a körkörös gazdaságban összekapcsolódó egyéb technológiai folyamatokkal, így a napelemes rendszerek üzemeltetésével, szennyvíztisztítással, biogáztermeléssel és P2G rendszerekkel üzleti-gazda-

sági szempontból foglalkozó szakirodalom kutatása került előtérbe. A többkörös szakirodalomgyűjtés- és feldolgozás iterációjában a korábbi körök tapasztalatai orientálták az újabb kutatási kört. A releváns szakirodalom összegyűjtése során követett folyamatot az 1. számú táblázat mutatja.

1. táblázat. Szakirodalomgyűjtési folyamat

Elsődleges kutatási terület	P2G üzemfejlesztési lehetőségek stratégiai elemzése	
Adatbázisok	Google Scholar és ScienceDirect	
Kritériumok	Scopus / Scimago adatbázis szerint Q1/Q2 folyóiratok 2016 és 2021 között megjelent folyóiratcikkei a témában	
Szakirodalomgyűjtés fázis	1.	2.
Szempont	Alga alapú üzemfejlesztési lehetőségek	Integrált üzleti-gazdasági lehetőségek a releváns területeken
1. kör keresési kulcsszavai	„biogas from algae” “Power-to-gas / P2G / PtG algae”	„Power-to-gas / P2G / PtG business model”
2. kör kiegészítői	“algae based biogas upgrading” “algae based biogas upgrading” “algal-bacterial biogas” “photosynthetic biogas”	„Solar business model” „Wastewater treatment plant (WWTP) business model” „Biogas plant business model”
3. kör kiegészítői	“techno-economic assesment” “financial analysis” “cost analysis” “circular economy”	„P2G and / Solar and / WWTP and / Biogas plant business model”

Eredmények

Alga alapú üzemfejlesztési lehetőségek

A mikroalgák egysejtű, autotróf organizmusok, amelyek a napfényt, a vizet és a légköri CO₂-t használják fel növekedésükhöz. A fotoszintézis folyamata során a légkörből elnyelt CO₂ értékes termékké – lipidekké – alakul, amelyek tovább felhasználhatók energiaforrásként. A mikroalgák mérete igen széles: a nano-tól a milliméteresig: önálló organizmusokként vagy láncokban/csoportokban léteznek. Ezzel szemben, a makroalgák többsejtű, eukarióta szervezetek, amelyek ágakból, gyökerekből és levelekből állnak. A makroalgák barna, vörös és zöld algák csoportjára oszthatók. Az erjesztési folyamat alapanyagaként, a makroalgák költséghatékony és környezetbarát alternatívát jelenthetnek a biogáztermeléshez, míg a mikroalgáknak jelentős szerepük lehet a biometánra fókuszáló körforgásos gazdaságban, mivel nemcsak alapanyagként szolgál-

hatnak az anaerob erjesztéshez, hanem a biogáz feljavítás egyik módját képezhetik és a fermentációban található többlet tápanyag eltávolítására is alkalmasak. [5]

Az alga alapú üzemfejlesztési lehetőségei a szakirodalom alapján három csoportra bonthatók.

- (1) A szakirodalom domináns területe az alga alapú biomasz-sza, mint a biogáztermelés alapanyagának elemzése. Ezek stratégiai szempontjai közül kiemelkedő jelentőségű az előkezelési folyamatok fontossága, illetve a társ-erjesztés alkalmazása a kereskedelmi léptékű üzemek gazdaságilag életképes üzemeltetéséhez (2. táblázat).
- (2) A szakirodalom továbbá jelentős figyelmet fordít az algák általi biogáz-feljavításra és a fermentáció-kezelésre (3. táblázat).
- (3) A power-to-gas rendszerekkel történő integráció a szakirodalomban eddig kevesebb figyelmet kapott, de ezen a területen is születtek fontos kutatási eredmények (4. táblázat).

2. táblázat. Az alga alapú biomasz, mint a biogáztermelés alapanyagának stratégiai szempontjai

Stratégiai szempont	Illusztratív megállapítások a szakirodalomból	Forrás
Harmadik generációs üzemanyagforrás mint versenyelőny	A makroalgák a tengeren nagyobb hozammal termeszthetők és belőlük erjesztés és feljavítás által biometán nyerhető ki, így a második generációs forrásokkal (azaz a nem élelmiszer alapú források, mint például a mezőgazdasági hulladék) szemben is előnyösek.	[5] [8]
Algák mesterséges termesztésének hatékonyságnövelése	Az algák mesterséges termesztése ún. fotobioreaktorokban valósulhat meg. A fotobioreaktorok telepítése és üzemeltetése magasabb költségekkel jár, mint a természetes vízbázisokban folytatott algatenyésztés.	[5]
Kereskedelmi léptékű hasznosítás	A mikroalgák kiváló alapanyagot képeznek a különböző bioüzemanyagok előállításához, azonban kereskedelmi szinten egyelőre inkább csak a szerves és organikus hulladékból származó biogáz és ebből feljavítás után biometán érhető el.	[29] [32]
Hatékonyság és fenntarthatóság fejlesztése	A jelenlegi technológiai K+F-en belül kiemelten fontos terület a különböző törzsek azonosítása és vizsgálata a biogáztermelés szempontjából, a biogázhozam növelése (például különböző előkezelési folyamatok vagy akár társ-erjesztés által), illetve a reaktor és üzem optimalizálása.	[33] [34] [35]
Gazdasági szempontok a felskálázásnál	A mikroalga alapú biogáz termelés nagy léptékű megvalósításához más gazdasági tényezőket is figyelembe kell venni, mint például a biomasz összetétele (pl. olajtartalom) és hozama, az átalakítás ára, különböző adók és más általános költségek.	[9] [36]
Gazdasági szempontok a technológiai választásnál	Gazdasági szempontból jelentős különbségek észlelhetők a két domináns mikroalga termesztési rendszer között. A biomasz nettó termelési költsége és a rendszer előkészítése is költségesebb a fotobioreaktorok esetében. Ez azért van, mert a tavas rendszerben a működési költségek jelentik a termelési költség jórészét (pl. munkaerő, üzemi számlák) míg a reaktorok esetében a tőkeköltségek számottevőbbek. Egyes becslések szerint, a fotobioreaktoros algatermesztés teljes tőkeigénye több, mint a tavas rendszereké.	[32]
Biogáztermelési kihívások kezelése előkezeléssel és ennek gazdasági életképessége	Az algák felhasználása, mint biogáz-alapanyag esetében még hosszabb tárolási idő mellett is csak az elméleti hozam maximum 50%-a várható egyes számítások szerint. Ezzel szemben az olyan alapanyagok, mint az élelmiszer maradék vagy mezőgazdasági hulladék akár 90% fölötti biológiai lebonthatósággal rendelkeznek. Ez problémát jelenthet, mivel a biogáztermelés gazdasági versenyképességének egyik fő tényezője a könnyen elérhető és magas hozamú alapanyag. Azonban az előkezelés növelheti a nehezen lebomló anyagok jövedelmezőségét, mivel bizonyítottan javítja a sejtfal lebomlását, a kémiai oxigénigény oldódását és a metántermelést. A mikroalgák esetében is a hibrid előkezelési technológiák (például hidrotörmális, biológiai-fizikai, ultrahang-elektrolízis előkezelés) jelentik a legprofitábilisabb megoldást, mivel csökkenthetik az energiaigényt és a folyamat költségeit, miközben magasabb biogázhozamot eredményeznek.	[29] [37] [38] [39]
Biofinomítók pozitív környezeti hatásának növelése	Giwa (2017) életciklus elemzést hajtott végre a marha ürülékkel felhasználó és tengeri algát hasznosító biofinomítók között és arra a következtetésre jutott, hogy a technológiák környezeti hatását a biogáz felhasználásának módja határozza meg. Amennyiben a biogázt energiatermelésre vagy szállításra használják, az állati ürülék alkalmazása környezetkímélőbb, míg a biogáz, a rendszeren belüli újrahasznosítása esetén az alga alapú technológia a környezetbarátabb.	[40]
Biofinomítók műszaki-gazdasági teljesítményének növelése	Thompson és társai (2021) számításai alapján egy Sargassum (barna makroalga) alapú biofinomító, mely a hidrotörmális előkezelést (HTP) és az anaerob erjesztési technológiát integrálja, 15,750 t/év alapanyag (Sargassum és nyers élelmiszer hulladék 25/75 arányban) betáplálásával 0,69 GWh _{el} villamos energia, 1,04 GWh _h hő és 15,750 t szilárd-cseppfolyós fermenté állítható elő. Ez maximum 12,76 millió dollár potenciális bevételt jelent, amennyiben a termelt áramot bevezetik a nemzeti villamosenergia-hálózatba, illetve, ha a biotrágyát teljes egészében exportálják.	[41]
Társ-erjesztéssel a gazdasági, társadalmi és környezeti teljesítmény növelése	Pozitív gazdasági, környezeti és társadalmi hatásokat eredményezhet a kofermentáció alkalmazása, azaz az állattenyésztési és/vagy mezőgazdasági alapanyagok keverése olyan alternatív alapanyagokkal, mint a makroalgák. A kofermentáció lehetőséget nyújt a regionálisan vagy időszakosan elérhető alapanyagok/hulladékok hasznosítására így elkerülve a természetes alapanyagok túlzott kimerítését, illetve a makroalgák kisebb környezeti hatással rendelkeznek, mint a legtöbb termék. A társ-erjesztés hozzájárul a hatékony hulladékkezeléshez is.	[31] [42]

3. táblázat. Az alga alapú biogázfeljavítás és fermentálé-kezelés stratégiai szempontjai

Stratégiai szempont	Illusztratív megállapítások a szakirodalomból	Forrás
Biogáz-feljavítás versenyképessége	A fotoszintetikus biogáz-feljavítás a CO ₂ mikroalgák általi megkötésén alapszik. A biogázt egy abszorpciós oszlopba fecskendezik be, amely a mikroalgás keveréket tartalmaz, így ott végbemegy a CO ₂ megkötése a napsugárzás, víz és tápanyagok felhasználásával biomassza, hő és oxigén előállításával együtt. Az alga-bakteriális fotobioreaktorok működése két részből áll: a mikroalgák megkötik a szén-dioxidot és ezzel egyidejűleg a szén-megkötő baktériumok szulfáttá oxidálják a H ₂ S-t, melyet a fotoszintetikus tevékenység következtében létrejövő magas oldott oxigén (DO) koncentráció közvetít. Az alga-bakteriális folyamatok kiemelkednek a hagyományos biogáz feljavítási módszerek közül, mivel egy lépésben végbemehet a CO ₂ és a H ₂ S eltávolítása költséghatékony és környezetbarát módon. A folyamat eredményeként létrejött biomassza további magas hozzáadott értékű termékek kivonására illetve a körkörös gazdaságon belül biogáztermelésre is alkalmas.	[43] [44] [45]
In situ, ex situ és hibrid változatok közötti választás	A biológiai szén-dioxid megkötési és biogáz-feljavítási folyamatok történhetnek mikroalgák, baktériumok vagy archaea segítségével. Ezeket a folyamat konfigurációja alapján három csoportra oszthatjuk: in situ (a hidrogén közvetlenül a bioreaktorba injektálják és végbemegy az endogén módon termelt CO ₂ megkötése), ex situ (a hidrogén és biogáz külön reaktorba kerül befecskendezésre) és hibrid (az első két módszer keveréke) biogáz feljavítás.	[46]
Magas befektetési költségek kompenzálása	Ángeles és társai (2020) a fotobioreaktorokkal társuló magas befektetési költségek ellenére is költséghatékony és fenntartható technológiaként emelik ki a zárt fotobioreaktorban végbemenő fotoszintetikus biogáz-feljavítást és biomassza termelést. Szerintük, annak ellenére, hogy a fotoszintetikus biogáz feljavítás kétszer akkora mértékű befektetést igényel, mint a piacvezető technológiák, a körkörös gazdaságon belül ezt ellensúlyozni lehet a biomassza értékesítése és a szennyvízkezelés által.	[43]
Társadalmi és környezeti hatások értékelése	A fenntartható technológiák szociális elfogadása egyre nagyobb mértékű, főleg, ha ezek alkalmazása új munkahelyek teremtésével is jár (például biotrágya termelése). Továbbá, a CO ₂ megkötése csökkenti a globális felmelegedés ütemét, míg a hagyományos technológiák gyakran feltételezik különböző alkotóelemek importálását, ami további CO ₂ kibocsátást eredményez a szállítás során. Ezen kívül, a fizikai/kémiai megoldás feltételezi az abszorpciós cső gyakori cseréjét, ami veszélyes hulladékok szállításával, tárolásával és kezelésével jár.	[47]
Hasznosítás a fermentálé kezelésére is	A nagyméretű üzemek esetében a fermentálé hasznosítása logisztikai problémát jelenthet, mivel a magas hozamú fermentálé termelődése nagy területű termőföldet igényel a tápanyagok hasznosítása szempontjából. Ezenkívül a folyékony fermentálé, a benne található tápanyagoknak köszönhetően az algák további természetésére is használható, így is hozzájárulva körkörös gazdasághoz. Nguyen és társai (2019) kísérlete bebizonyította, hogy a Scenedesmus nevű mikroalga képes egyidejűleg eltávolítani a szén-dioxidot az anaerob erjesztés során keletkező biogázból és fermentáléból is, ami arra enged következtetni, hogy a biogáz és fermentálé használható lehet párhuzamosan és fenntartható módon.	[29] [50]

4. táblázat. Az alga alapú P2G rendszerek stratégiai szempontjai

Stratégiai szempont	Illusztratív megállapítások a szakirodalomból	Forrás
Biometán előállításának hatékonysága	Ning és társai (2021) a biometán felhasználása, mint bioüzemanyag szempontjából közelíti meg a témát. Szerintük a legsürgetőbb probléma a biometán előállítására nézve az erőforrások és a folyamat optimalizálására és fenntarthatóságára vonatkozik, ebből a szempontból pedig azokat az innovatív technológiákat emelik ki, melyek a hagyományosan alkalmazott anaerob erjesztést bioelektrokémiai megoldásokkal ötvözik egy körkörös és lépcsőzetes gazdaságon belül.	[51]
Karbonsemlegesség	A biológiai és termokémiai bioenergia-technológiák a power-to-gas folyamattal társítva nagyban hozzájárulhatnak az energetikai és mezőgazdasági körkörös gazdasági rendszerekkel társított üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez.	[29]
Költséghatékonsági és klímavédelmi szempontok közötti egyensúlyozás	A különböző technológiák jelenlegi állása szerint gazdasági szempontból az anaerob erjesztés párosítása a hagyományos fizikai-kémiai biogáz feljavítással (amine scrubbing) eredményezi a legköltséghatékonyabb biometántermelést. Azonban, a fenntarthatósági és karbonmentesítési törekvéseket szem előtt tartva az ex-situ biometántermelés az előnyösebb technológia, mivel újrahasonítja a CO ₂ -t.	[29]
Új körkörös rendszerek kialakítása	Fózer és társai (2020) a Spirulina platensis mikroalga általi CO ₂ megkötés és a nedves szerves nyersanyag katalitikus elgázosítás társítását vizsgálta egy power-to-gas rendszerben az ingadozó villamos energia tárolására és a CO ₂ közvetlen hasznosítására vonatkozóan. Az általuk bemutatott módszer lehetővé teszi a nedves mikroalgából származó biomasszában hidrogénben és C1-C2-ben gazdag tüzelőanyag-árammá történő átalakítását hidrotérmális konverzióval, amelyet aztán metánná tovább valorizálnak. Leonzio (2021) szerint az integrált power-to-gas rendszerek célja az energiahatékonyság és metántermelés növelése a biogázban/szintézisgázban lévő, majd metanizáció útján metánná alakított szén-dioxid kombinálásával a biogázban/szintézisgázban már jelenlévő metánnal. A Sabatier folyamat integrálása plazma gázosítással is előnyös lehet, ahol a CO ₂ a bioreaktorban található algák természetésére hasznosítható. Az algák biomasszaként szolgálnak a plazma gázosító számára, ami pedig a hidrogént biztosítja a Sabatier reakcióhoz.	[30] [52]
Biogáz-feljavítás és ex situ biometanizáció párhuzamos telepítése	Wall és társai (2017) szerint egy erjesztő közösségi alapon működve algákat és különböző forrásokból származó alapanyagokat hasznosít a szezonális és regionális elérhetőség alapján. Nappal a biogáz feljavítását egy mikroalga rendszer végzi, míg éjjel a biogáz egy ex-situ biológiai metanizációs reaktorba kerül, ahol hozzáadódik az elektrolízis során termelt hidrogén.	[5]

Üzleti modellek kutatása az alga alapú biometántermelés kapcsolódó területein

Annak ellenére, hogy számos tanulmány vizsgálja a power-to-gas (P2G) vagy a power-to-methane folyamatot (P2M), a

biogázüzemeket, a szennyvíztisztító telepeket vagy a fotovoltaiuk napelem parkokat mint megújuló energiaforrást, a közelmúltban megjelent cikkek közül csak néhány foglalkozik e négy elem közül legalább kettő integrálásának gazdasági vonatkozásaival, annak

ellenére, hogy ezek egyaránt a körkörös gazdaságfejlesztés részei lehetnek [21] [53]. Az alábbiakban e területek stratégiai szempontjaira vonatkozó kutatások rövid ismertetése olvasható.

Power-to-gas üzemek stratégiai szempontjainak kutatása

A P2G üzleti modellek tekintetében a legújabb tanulmányok általában a power-to-gas technológia egy adott régió belüli gazdasági értékelésével párhuzamosan foglalkoznak. Például, Van Dael és társai [54] szerint a rugalmas üzleti modellek adaptálása elengedhetetlen a P2G üzemek számára. Továbbá, miután összehasonlították a különböző németországi, belgiumi és izlandi power-to-gas alkalmazásokat, Weidner és társai [55] három fő tényezőt azonosítanak, amelyek jelentősen javíthatják a P2G üzleti modelleket és maximalizálhatják a profitot: (1) a méretnövelés, mivel jelentősen csökkenti a hidrogén költséget; (2) távoli, elszigetelt helyekre való összpontosítás, és (3) különböző power-to-gas alkalmazások kombinációja. Leonzio [56] „business-to-business” típusú megvalósíthatósági tanulmányt készített németországi egy power-to-gas üzemre, és kiemelte az elérhető megújuló energia 100%-ának felhasználását mint sikertényezőt.

Napelemparkok stratégiai szempontjainak kutatása

A napelemparkokra vonatkozó üzletimodell-kutatások többsége a fejlődő világ piacaira összpontosít [57] [58] [59] [60]. A globális gazdasági, társadalmi, politikai és technológiai különbségek miatt e tanulmányok eredményei ritkán alkalmazhatók közvetlenül az európai piacra vonatkozóan. Ezenkívül a fotovoltaikus energiával kapcsolatos üzletimodell-kutatások gyakran a napelemek kereskedelmi forgalmazását és alkalmazását vizsgálják [61] [62].

Szennyvíztisztító telepek stratégiai szempontjainak kutatása

A szennyvíztisztító telepekhez kötődő üzleti modelleket illetően a tanulmányok többsége az egy specifikus technológiai vonatkozással vagy funkcionális kiegészítéssel foglalkozik, például a tápanyag-újrahasznosítás bevezetésével [63] vagy a foszfor-visszanyerés [64] és az erőforrás-visszanyerés [65] kihívásaival. Bár a szakirodalomban meghatározó téma a szennyvíztisztító telepek körforgásos gazdaságban betöltött szerepe is [21] [22] [23] [24], kevesen foglalkoznak részletesen konkrét üzleti modellekkel. Donner és társai [24] szerint a körkörös üzleti modellekre vonatkozó koncepcionális és menedzsment meglátások hiányoznak a közelmúltban megjelent tanulmányokból, ezért új körkörös üzletimodell-típológiát mutat be a mezőgazdasági területre vonatkozóan, illetve bemutatja az azonosított hat üzleti modell összekapcsolódását, amelyek közül az egyik magában foglalja a biogázüzemeket is. A szerzők elemzése kiegészíti a korábbi kutatásokat azáltal, hogy tovább integrálja a power-to-methane folyamatot a biogazdasági megközelítésbe.

Biogázüzemek stratégiai szempontjainak kutatása

A biogázüzemekkel foglalkozó tanulmányok jelentős többsége az üzleti modellekkel és az üzleti modell innovációjával foglalkozik egy adott kontextusban, például számos tanulmány készült a svéd farm-alapú, mezőgazdasági biogáziparról [66] [67] [68] [69] [70] [71]. A hálózatok és az együttműködés kiemelt területnek számít ebben a kontextusban (hasonlóképp a power-to-gas technológiafejlesztéshez [72]), például Karlsson és társai [69] hálózatos üzleti modelleket mutat be, míg Kanda és társai [71] körkörös üzleti ökoszisztémákkal foglalkozik.

Ezzel szemben Yousuf és társai [73] a társadalmi üzleti modellek fontosságát hangsúlyozzák, és emellett érvelnek, hogy a gazdasági fenntarthatatlanság elkerülése érdekében a biogáz technológia társadalmi integrációja ugyanolyan fontos, mint a gazdasági integráció. A körkörös gazdasággal kapcsolatban Valve és társai [66] biogáz- és hulladékgazdálkodás körkörös üzleti modelljeit emelik ki finnországi kontextusban.

Más tanulmányok a fejlődő piacokat vizsgálják, mint például a rurális Kenya [74], a Fülöp-szigetek [75] vagy Ghána [76]. E tanulmányok középpontjában azonban a környezetüknek megfelelő üzleti modellek kidolgozása, valamint a biogáz technológia bevezetésének gazdasági és társadalmi megvalósíthatóságának felmérése áll. Például Agyenim és társai [76] előtérbe helyezik a biogáz-erőmű és a fotovoltaikus erőmű sikeres integrációjához szükséges üzleti modelleket.

Az integrált stratégiai szempontok hiánya

A szakirodalomkutatás alapján kevés az olyan tanulmány, amely integrált megközelítést alkalmaz az alga alapú biometántermeléshez kapcsolódó négy tényező, a napelemparkok, a P2G, a szennyvíztisztítás és a biogázüzemek témájában. Ezen cikkek fókuszja általában a P2G folyamat egy biogáz üzemhez kapcsolva [56] [77], illetve a P2G folyamat szennyvíztisztítással kombinálva [21] [24] vagy fotovoltaikus energia hasznosításával [76].

Bár a szennyvíztisztító telepek, a biogázüzemek, a napenergia és a P2G integrálásának technológiai oldaláról már számos kutatás született [78] (hasonlóan az előző fejezetben bemutatott alga-fókuszú kutatásokhoz), a témával kapcsolatos legújabb szakirodalomból hiányoznak az üzleti, stratégiai jellegű integrációval foglalkozó kutatások. Ez a kutatási rés az alga alapú P2G üzemek fejlesztését támogató új kutatásokat orientálhatja.

Konklúzió

A tanulmány fókuszában az algahasznosítás és a P2G kombinációja, illetve e kombinációhoz kapcsolódó folyamatok stratégiai szempontú elemzése állt szakirodalmi áttekintés alapján. Az alga alapú üzemfejlesztési lehetőségek tekintetében az alga biomasszára épülő biogáztermelés, az alga alapú biogáz-feljavítás és az algahasznosítással kombinált P2G rendszerek területén is publikáltak új kutatási eredményeket az elmúlt 5 évben. E területeken stratégiai jelentőségűnek számít a különböző biogáz- és biometán-termelési konfigurációk gazdasági és környezeti teljesítményének fejlesztése, illetve e szempontok közötti egyensúlyozás (például a kisebb beruházási költségű in-situ biogáz-feljavítás dekarbonizációs potenciálja alacsonyabb lehet, mint az ex-situ biometanizációé). Fontos szakirodalmi következtetés továbbá, hogy az alga alapú biogáztermelés kereskedelmi léptékű üzemfejlesztése során a társ-erjesztéssel növelhető gazdasági, társadalmi és környezeti teljesítmény. Figyelembe veendő szinergia ezen kívül a fermentlé- és szennyvízkezelés területén elérhető hatékonyságnövelés az algák által.

Az algahasznosítást és a P2G-t integráló rendszerekre a szakirodalom még kevésbé fókuszált, azonban már sor került néhány különböző konfiguráció megalkotására és értékelésére a körkörös gazdaság fejlesztésének céljából. Ezen új konfigurációk kutatásának egyik iránya lehet az alga alapú P2G üzemfejlesztés vizsgálata e szegmens körforgásos működésének egyéb rendszerlemeivel. A P2G technológia, fotovoltaikus villamos energia és a mezőgazdasági vagy szennyvíz alapú biogáz termelés integrált stratégiai, üzleti szempontú vizsgálata újszerűnek tekinthető, jelenleg a nem-

zetközi szakirodalom e területéről nincs nyilvánosan elérhető jelentés.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton mond köszönetet a Kutatás-fejlesztési és Innovációs Állami Tőkealapkezelő Zrt. / Hiventures Zrt., valamint a Vértesi Erőmű Zrt. számára a K+F+I tevékenységek megvalósításának támogatásáért.

Készült a 2019-2.1.13-TÉT_IN-2020-00061 azonosítójú, „Alga biomasszából előállított biogáz energetikai felhasználása a tiszta környezetért: műszaki-környezeti-gazdasági hatások” című projekt keretében.

Irodalom

- [1] M. Bailera, P. Lisbona, L. M. Romeo és S. Espatolero, „Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 292- 312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>, 2017.
- [2] H. Blanco és A. Faaij, „A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp. 1049-1086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.062>, 2018.
- [3] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinius, V. Tietze, B. Kumar és D. Stolten, „Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, pp. 4285-4294. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.123>, 2015.
- [4] M. Zavarkó és Z. Csedő, „Körkörös gazdaságfejlesztési és dekarbonizációs lehetőségek a power-to-gas technológia magyar szennyvíztisztító telepeken való alkalmazásával,” *Hidrológiai Közlöny*, 101 (3), p. 60, 2021.
- [5] D. M. Wall, S. McDonagh és J. D. Murphy, „Cascading biomethane energy systems for sustainable green gas production in a circular economy,” *Bioresource technology*, 243, pp. 1207-1215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.115>, 2017.
- [6] Z. Csedő, „Power-to-Gas: egy ígéretes lehetőség a megújuló energiaforrások integrációjára,” *Zöld Ipar Magazin*, 7 (10), pp. 28-29, 2017.
- [7] M. del Rosario Rodero, R. Lebrero, E. Serrano, E. Lara, Z. Arbib, P. A. García-Encina és R. Muñoz, „Technology validation of photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale algal-bacterial photobioreactor,” *Bioresource technology*, 279, pp. 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.110>, 2019.
- [8] S. Anto, S. S. Mukherjee, R. Muthappa, T. Mathimani, G. Deviram, S. S. Kumar, T. K. Verma és A. Pugazhendhi, „Algae as green energy reserve: Technological outlook on biofuel production,” *Chemosphere*, 242, p. 125079. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125079>, 2020.
- [9] S. R. Chia, K. W. Chew, P. L. Show, Y. J. Yap, H. C. Ong, T. C. Ling és J. S. Chang, „Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review,” *Biotechnology journal*, 13(6), p. 1700618. [10.1002/biot.201700618](https://doi.org/10.1002/biot.201700618), 2018.
- [10] A. Imre, R. Kustán és A. Groniewsky, „Thermodynamic Selection of the Optimal Working Fluid for Organic Rankine Cycles,” *Energies*, 12, p. 2028. <https://doi.org/10.3390/en12102028>, 2019.
- [11] M. Zavarkó, A. Imre, G. Pörzse és Z. Csedő, „Past, Present and Near Future: An Overview of Closed, Running and Planned Biomethanation Facilities in Europe,” *Energies*, 14, p. 5591. <https://doi.org/10.3390/en14185591>, 2021.
- [12] Z. Csedő, B. Sinóros-Szabó és M. Zavarkó, „Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 13 (18), p. 4973. <https://doi.org/10.3390/en13184973>, 2020.
- [13] G. Pörzse, Z. Csedő és M. Zavarkó, „Disruption Potential Assessment of the Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 14 (8), p. 2297. <https://doi.org/10.3390/en14082297>, 2021.
- [14] H. Ameli, M. Qadrdan és G. Strbac, „Techno-economic assessment of battery storage and Power-to-Gas: A whole-system approach,” *Energy Procedia*, 142, pp. 841-848, 2017.
- [15] R. Peters, M. Baltruweit, T. Grube, R. C. Samsun és D. Stolten, „A techno economic analysis of the power to gas route,” *Journal of CO₂ Utilization*, 34, p. 616–634. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.07.009>, 2019.
- [16] G. Pintér, „The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries—A Case Study,” *Energies*, 13 (23), p. 6408. <https://doi.org/10.3390/en13236408>, 2020.
- [17] K. Kummer és A. R. Imre, „Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology,” *Energies*, 14, p. 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>, 2021.
- [18] H. Zsiborács, G. Pintér, A. Vincze, Z. Birkner és N. Hegedűsné Baranyai, „Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting,” *Energy Reports*, 7, pp. 3805-3818. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.007>, 2021.
- [19] Z. Csedő, „A power-to-gas technológia implementációs lehetőségei a hazai szennyvíztisztító telepeken,” *Energiagazdálkodás*, 62 (különszám), pp. 3-8, 2021.
- [20] Z. Csedő, „A power-to-gas technológiafejlesztés tapasztalatai Magyarországon,” *Energiagazdálkodás*, 61 (5-6), p. 16, 2020.
- [21] K. M. Morsy, M. K. Mostafa, K. Z. Abdalla és M. M. Galal, „Life Cycle Assessment of Upgrading Primary Wastewater Treatment Plants to Secondary Treatment Including a Circular Economy Approach,” *Air, Soil and Water Research*, 13, p. 1178622120935857. <https://doi.org/10.1177/1178622120935857>, 2020.
- [22] M. Smol, C. Adam és M. Preisner, „Circular economy model framework in the European water and wastewater sector,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>, 2020.
- [23] M. Qadir, P. Drechsel, B. Jiménez Cisneros, Y. Kim, A. Pramanik, P. Mehta és O. Olaniyan, „Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source,” *Natural resources forum*, 44(1), pp. 40-51. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>, 2020.
- [24] M. Donner, R. Gohier és H. de Vries, „A new circular business model typology for creating value from agro-waste,” *Science of the Total Environment*, 716, p. 137065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137065>, 2020.
- [25] Z. Csedő, „Útmutató a sikeres változáshoz: a szervezeti változás típusai,” *Kórház*, 14 (9), pp. 56-57, 2007.
- [26] Z. Csedő, „Ha már átalakítunk: mit és hogyan változtassunk,” *Kórház*, 14 (4), pp. 18-19, 2007.

- [27] Z. Csedő, Szervezeti változás és változásvezetés a folyamatos differenciálódás és integráció tükrében: az innovatív gyógyszeripar példája, Doktori (PhD) értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, 2006.
- [28] Z. Csedő, „Hogyan lássunk neki a stratégiaalkotásnak? Stratégiai megközelítések,” *Kórház*, 14 (10), pp. 32-33, 2007.
- [29] B. Wu, R. Lin, R. O’Shea, C. Deng, K. Rajendran és J. D. Murphy, „Production of advanced fuels through integration of biological, thermo-chemical and power to gas technologies in a circular cascading bio-based system,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, p. 110371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110371>, 2021.
- [30] D. Fózér, M. Volanti, F. Passarini, P. S. Varbanov, J. J. Klemeš és P. Mizsey, „Bioenergy with carbon emissions capture and utilisation towards GHG neutrality: Power-to-Gas storage via hydrothermal gasification,” *Applied Energy*, 280, p. 115923. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115923>, 2020.
- [31] M. Dorella, F. Romagnoli, A. Gruduls, M. Collotta és G. Tomasoni, „Design of a biogas plant fed with *Cladophora* Sp. algae and wheat straw,” *Energy Procedia*, 147, pp. 458-466. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.046>, 2018.
- [32] H. M. Zabed, S. Akter, J. Yun, G. Zhang, Y. Zhang és X. Qi, „Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, p. 109503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503>, 2020.
- [33] D. Marín, A. A. Carmona-Martínez, S. Blanco, R. Lebrero és R. Muñoz, „Innovative operational strategies in photosynthetic biogas upgrading in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor,” *Chemosphere*, 264, p. 128470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128470>, 2021.
- [34] J. J. Milledge, B. V. Nielsen, S. Maneein és P. J. Harvey, „A Brief Review of Anaerobic Digestion of Algae for Bioenergy,” *Energies*, 12(6), p. 1166. <https://doi.org/10.3390/en12061166>, 2019.
- [35] T. Adamietz, W. Jurkowski, J. Adolph és T. B. Brück, „Biogas yields and composition from oil-extracted halophilic algae residues in conventional biogas plants operated at high salinities,” *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 42(12), pp. 1915-1922. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02185-8>, 2019.
- [36] R. Y. Kannah, S. Kavitha, O. P. Karthikeyan, E. R. Rene, G. Kumar és J. R. Banu, „A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production,” *Bioresource technology*, 332, p. 125055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>, 2021.
- [37] Y. N. Wu, M. Mattsson, M. W. Ding, M. T. Wu, J. Mei és Y. L. Shen, „Effects of Different Pretreatments on Improving Biogas Production of Macroalgae *Fucus vesiculosus* and *Fucus serratus* in Baltic Sea,” *Energy & fuels*, 33(3), pp. 2278-2284. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b04224>, 2019.
- [38] T. M. Thompson, B. R. Young és S. Baroutian, „Advances in the pretreatment of brown macroalgae for biogas production,” *Fuel Processing Technology*, 195, p. 106151. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106151>, 2019.
- [39] E. Kendir és A. Ugurlu, „A comprehensive review on pretreatment of microalgae for biogas production,” *Journal of Energy Research*, 42(12), pp. 3711-3731. <https://doi.org/10.1002/er.4100>, 2018.
- [40] A. Giwa, „Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of biogas production from marine algae and cattle manure biorefineries,” *Bioresource Technology*, 244(2), pp. 1470-1479. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.143>, 2017.
- [41] T. M. Thompson, P. Ramin, I. Udugama, B. R. Young, K. V. Germaey és S. Baroutian, „Techno-economic and environmental impact assessment of biogas production and fertiliser recovery from pelagic *Sargassum*: A biorefinery concept for Barbados,” *Energy Conversion and Management*, 245, p. 114605. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114605>, 2021.
- [42] F. C. Ertem, P. Neubauer és S. Junne, „Environmental life cycle assessment of biogas production from marine macroalgal feedstock for the substitution of energy crops,” *Journal of cleaner production*, 140, pp. 977-985. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.041>, 2017.
- [43] R. A. E. Ángeles, J. Gutiérrez, C. A. Sepúlveda-Muñoz, O. Fernández-Ramos, R. Muñoz és R. Lebrero, „Optimization of photosynthetic biogas upgrading in closed photobioreactors combined with algal biomass production,” *Journal of Water Process Engineering*, 38, p. 101554. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101554>, 2020.
- [44] D. Marín, E. Posadas, P. Cano, V. Pérez, S. Blanco, R. Lebrero és R. Muñoz, „Seasonal variation of biogas upgrading coupled with digestate treatment in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor,” *Bioresource technology*, 263, pp. 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.117>, 2018.
- [45] L. R. Assunção, P. A. Mendes, S. Matos és S. Borschiver, „Technology roadmap of renewable natural gas: Identifying trends for research and development to improve biogas upgrading technology management,” *Applied energy*, 292, p. 116849. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116849>, 2021.
- [46] S. Fu, I. Angelidaki és Y. Zhang, „In situ Biogas Upgrading by CO₂-to-CH₄ Bioconversion,” *trends in Biotechnology*, 39(4), pp. 336-347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>, 2021.
- [47] A. Toledo-Cervantes, J. M. Estrada, R. Lebrero és R. Muñoz, „A comparative analysis of biogas upgrading technologies: Photosynthetic vs physical/chemical processes,” *Algal research*, 25, pp. 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.006>, 2017.
- [48] P. G. Scarcelli, G. Ruas, R. Lopez-Serna, M. L. Serejo, S. Blanco, M. Á. Boncz és R. Muñoz, „Integration of algae-based sewage treatment with anaerobic digestion of the bacterial-algal biomass and biogas upgrading,” *Bioresource Technology*, 340, p. 125552. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125552>, 2021.
- [49] N. Kohlheb, M. van Afferden, E. Lara, Z. Arbib, M. Conthe, C. Poitzsch, T. Marquardt és M. Y. Becker, „Assessing the life-cycle sustainability of algae and bacteria-based wastewater treatment systems: High-rate algae pond and sequencing batch reactor,” *Journal of environmental management*, 264, p. 110459. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110459>, 2020.
- [50] M. L. T. Nguyen, C. Y. Lin és C. H. Lay, „Microalgae cultivation using biogas and digestate carbon sources,” *Biomass and Bioenergy*, 122, pp. 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.050>, 2019.
- [51] X. Ning, R. Lin, R. O’Shea, D. Wall, C. Deng, B. Wu és J. D. Murphy, „Emerging bioelectrochemical technologies for biogas production and upgrading in cascading circular bioenergy systems,” *Iscience*, 24(9), p. 102998. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102998>, 2021.
- [52] G. Leonzio, „Power to Gas Systems Integrated with Anaerobic Digesters and Gasification Systems,” *Waste Biomass Valor* 12, pp. 29-64. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00914-4>, 2021.

- [53] S. Michailos, M. Walker, A. Moody, D. Poggio és M. Pourkashanian, „Biomethane production using an integrated anaerobic digestion, gasification and CO₂ biomethanation process in a real waste water treatment plant: A techno-economic assessment,” *Energy Conversion and Management*, 209, p. 112663. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112663>, 2020.
- [54] M. Van Dael, S. Kreps, A. Virag, K. Kessels és K. Remans, „Techno-economic assessment of a microbial power-to-gas plant – Case study in Belgium,” *Applied Energy*, 215, pp. 416-425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.092>, 2018.
- [55] S. Weidner, M. Faltenbacher, I. François, D. Thomas, J. B. Skúlason és C. Maggi, „Feasibility study of large scale hydrogen power-to-gas applications and cost of the systems evolving with scaling up in Germany, Belgium and Iceland,” *International journal of hydrogen energy*, 43(33), pp. 15625-15638. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.167>, 2018.
- [56] G. Leonzio, „Design and feasibility analysis of a Power-to-Gas plant in Germany,” *Journal of Cleaner Production*, 162, pp. 609-623. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.168>, 2017.
- [57] P. D. Rigo, J. C. M. Siluk, D. P. Lacerda és J. P. Spellmeier, „Competitive business model of photovoltaic solar energy installers in Brazil,” *Renewable Energy*, 181, pp. 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.031>, 2022.
- [58] H. Elmoustapha és T. Hoppe, „Challenges and Opportunities of Business Models in Sustainable Transitions: Evidence from Solar Energy Niche Development in Lebanon,” *Energies*, 13(3), p. 670. <https://doi.org/10.3390/en13030670>, 2020.
- [59] B. Rajshree és S. Manan, „Solar photovoltaic energy in India: business feasibility study and analogy of policies,” *International Journal of Energy and Water Resources*, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00098-x>, 2021.
- [60] Y. Wu, J. Zhou, Y. Hu, L. Li és X. Sun, „A TODIM-Based Investment Decision Framework for Commercial Distributed PV Projects under the Energy Performance Contracting (EPC) Business Model: A Case in East-Central China,” *Energies*, 11(5), p. 1210. <https://doi.org/10.3390/en11051210>, 2018.
- [61] C. Nolden, J. Barnes és J. Nicholls, „Community energy business model evolution: A review of solar photovoltaic developments in England,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, p. 109722. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109722>, 2020.
- [62] I. Scott, „A business model for success: Enterprises serving the base of the pyramid with off-grid solar lighting,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp. 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.179>, 2017.
- [63] M. Fischer, E. Schramm és M. Winker, „How business models can help to introduce nutrient recycling in hydroponic greenhouses,” *Watersolutions*, (2), pp. 58-65. , 2019.
- [64] M. C. Chrispim, M. Scholz és M. A. Nolasco, „Phosphorus recovery from municipal wastewater treatment: Critical review of challenges and opportunities for developing countries,” *Journal of environmental management*, 248, p. 109268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109268>, 2019.
- [65] M. C. Zijp, S. L. Waaijers-van Der Loop, R. Heijungs, M. L. M. Broeren, R. Peeters, A. Van Nieuwenhuijzen és L. Posthuma, „Method selection for sustainability assessments: The case of recovery of resources from waste water,” *Journal of environmental management*, 197, pp. 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.006>, 2017.
- [66] H. Valve, D. Lazarevic és N. Humalisto, „When the circular economy diverges: The co-evolution of biogas business models and material circuits in Finland,” *Ecological Economics*, 185, p. 107025. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107025>, 2021.
- [67] N. P. Karlsson, M. Hoveskog, F. Halila és M. Mattsson, „Early phases of the business model innovation process for sustainability: Addressing the status quo of a Swedish biogas-producing farm cooperative,” *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 2759-2772. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.136>, 2018.
- [68] N. P. Karlsson, F. Halila, M. Mattsson és M. Hoveskog, „Success factors for agricultural biogas production in Sweden: A case study of business model innovation,” *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2925-2934. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.178>, 2017.
- [69] N. P. Karlsson, „Business models and business cases for financial sustainability: Insights on corporate sustainability in the Swedish farm-based biogas industry,” *Sustainable Production and Consumption*, 18, pp. 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.01.005>, 2019.
- [70] N. P. Karlsson, M. Hoveskog, F. Halila és M. Mattsson, „Business modelling in farm-based biogas production: towards network-level business models and stakeholder business cases for sustainability,” *Sustainability Science*, 14(4), pp. 1071-1090. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0584-z>, 2019.
- [71] W. Kanda, M. Geissdoerfer és O. Hjelm, „From circular business models to circular business ecosystems,” *Business Strategy and the Environment*, 30(6), pp. 2814-2829. <https://doi.org/10.1002/bse.2895>, 2021.
- [72] Z. Csedő, „A power-to-gas technológiafejlesztés üzleti modellje Magyarországon,” *Energiagazdálkodás*, 60 (különszám) , pp. 17-20, 2019.
- [73] A. Yousuf, S. Sultana, M. U. Monir, A. Karim és S. R. B. Rahmaddulla, „Social business models for empowering the biogas technology,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(2), pp. 99-109. <https://doi.org/10.1080/15567249.2016.1255677>, 2017.
- [74] R. G. Hamid és R. E. Blanchard, „An assessment of biogas as a domestic energy source in rural Kenya: Developing a sustainable business model,” *Renewable Energy*, 121, pp. 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.032>, 2018.
- [75] M. Röder, C. Jamieson és P. Thornley, „(Stop) burning for biogas. Enabling positive sustainability trade-offs with business models for biogas from rice straw,” *Biomass and Bioenergy*, 138, p. 105598. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105598>, 2020.
- [76] F. B. Agyenim, P. D. Dzamboe, M. Mohammed, S. Bawakyillenuo, R. Okrofu, E. Decker és E. H. Nyarko, „Powering communities using hybrid solar-biogas in Ghana, a feasibility study,” *Environmental Technology & Innovation*, 19, p. 100837. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100837>, 2020.
- [77] R. Bedoić, H. Dorotić, D. R. Schneider, L. Čuček, B. Čosić, T. Pukšec és N. Duić, „Synergy between feedstock gate fee and power-to-gas: An energy and economic analysis of renewable methane production in a biogas plant,” *Renewable Energy*, 173, pp. 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.124>, 2021.
- [78] M. Loizidou, K. Moustakas, M. Rehan, A. S. Nizami és M. Tabatabaei, „New developments in sustainable waste-to-energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, p. 111581. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111581>, 2021.

A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia – merre tovább?

Dr. Csedő Zoltán

tanszékvezető egyetemi docens, Budapesti Corvinus Egyetem, Vezetés és Szervezés Tanszék; ügyvezető igazgató, Power-to-Gas Hungary Kft.

Dr. Imre Attila

tanszékvezető egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék; tudományos tanácsadó, Energetikai Kutatóközpont

A fenntarthatóság érdekében és az időjárásfüggőmegújuló energiaforrások miatt energiatárolókat kell a villamosenergia-rendszerbe illeszteni. A rövid idejű tárolás jól megoldható akkumulátorokkal, a szezonális tárolás azonban továbbra is kihívást jelent. Az utóbbi időben a klasszikus hosszú távú tárolási technológiák (pl. szivattyús tározók) mellett új módszerek állnak rendelkezésre. Az akkumulátorok egyre jobbak, kisebb az önkisülésük és vannak köztük nagy kapacitású típusok is; ezek akár már szezonális tárolásra is használhatók lesznek, de a teljes igényt nem tudják fedezni. Ezért a Power-to-Gas módszerek egyre nagyobb szerepet kaphatnak az energiatárolásban.

A Power-to-Methane technológia előnye, hogy könnyen tárolható és újra felhasználható metánt termel, ami kémiaiilag meg egyezik a földgázban található metánnal, így azzal együtt, vagy azt helyettesítve használható, tárolható. A P2M technológiával előállított metánt így gyakran nevezik SNG-nek, ami egyformán jelent "Substitute Natural Gas"-t (mutatva ezzel a felhasználhatóságot) és "Synthetic Natural Gas"-t, utalva ezzel az előállításra.

Olyan esetekben, amikor fosszilis eredetű CO₂-kibocsátás kerülne átalakításra, további diszkusszió tárgyát képezheti a megfelelő kifejezés használata, ugyanis a technológia nettó-karbonsemleges is; csak annyi szén-dioxid jön ki az újrafelhasználáskor, amennyi a metanizációkor bement. Bár a villamos energia füstgázhasznosítás esetén is származhat megújuló forrásból, a biogén CO₂-forrás hiánya miatt a „megújuló gáz” kifejezés csak részben lenne igaz. A helyzet kezelésére a nemzetközi gyakorlat időnként egy új kifejezést, a „tisztá szintetikus földgáz” (Clean SNG) használja, amely egyszerre utal az előállítás módjára és semleges környezeti hatására. Ezzel szemben, amennyiben a bemenő szén-dioxid biológiai eredetű (pl. biogáz), a végtermékként kapott biometán zöldnek tekinthető. Épp ezért, a végtermékként kapott biometánt ilyen esetekben az SNG helyett sokkal inkább nevezhetnénk akár RNG-nek, azaz "Renewable Natural Gas" -nek (megújuló "földgáz-nak"). A kialakuló akadémiai és ipari terminológia egy ilyen innovatív területen közvetlenül hat a jogi szabályozásra is, és – mint arra több korábbi kutatás is rámutatott – az új technológiák elterjedését, használatát meghatározza az, hogy a jogalkotás és szabályozás az egyes technológiákat és végtermékeket hogyan definiálja és támogatja.

A 3. Magyar Power-to-Gas Konferenciára 2021. december 10-én került sor [1]; az előző évitől eltérően ezt sikerült jelenléti módon megtartanunk. A két korábbi, 2019 tavaszán [2], illetve 2020 őszén [3] megrendezett konferencia a hazai kutatóhálózatot, illetve a technológia hazai szerepét mutatta be; a mostani konferencián az elmúlt két év eredményeire igyekeztünk fókuszálni. A mosta-

nihoz hasonlóan az első két konferencia anyagából is megjelent egy-egy különszám; ezek (illetve az előadások anyagai) a konferencia-honlapokról érhetőek el [1-3]. Emellett fontos megemlíteni, hogy 2021-ben megjelent az *Energies* folyóirat "Seasonal Energy Storage with Power-to-Methane Technology" című különszáma [4], amely – zömmel hazai szerzők közreműködésével – mutatta be az energiatárolási célzatú biológiai metanizáció európai helyzetét, különös tekintettel a hazai lehetőségekre, eredményekre [5-9].

A 3. Magyar Power-to-Gas Konferencia előadásai új megközelítésekkel kiegészítik, tovább fejlesztik és újabb kutatási irányokat is kijelölnek a korábbi eredmények nyomán. Az iparági és állami nézőpontok „első kézből” történő megosztására került sor az energiatárolás szerepét és innovációit illetően. Előrelépést jelent a P2M technológia kereskedelmi léptékű hasznosítása felé egy szennyvíztisztító telepen való alkalmazási lehetőségek vizsgálata és az ott szerzett K+F tapasztalatok bemutatása a Power-to-Gas Hungary Kft. biometanizációs technológiával. A kutatások újabb irányként kerültek ismertetésre továbbá az alga-alapú biogáz- és biometántermelés műszaki és gazdasági szempontjai, amelyek a körkörös gazdaság fejlesztésére "irányítják" a P2M implementáció fókuszát. Végül, a P2M alapú energiatárolás egy új megközelítése, a pszeudo-akkumulátorok koncepciója, illetve a P2M hatásfokának hulladék-hasznosítással történő növelése is lépésről lépésre közelebb viszi a technológiát a fokozott környezeti és gazdasági értékteremtéshez.

Úgy véljük, hogy a biológiai Power-to-Methane technológia – főként, ha biogáz-dúsítással kötjük össze – hamarosan jelentős szereplője lesz az energiatárolási piacnak. A „megújuló” metánt könnyű tárolhatósága és felhasználhatósága, valamint karbonsemlegessége az akkumulátorok vagy a hidrogénalapú tárolás versenytársává teheti, különösen a több hónapot meghaladó tárolási idők, azaz szezonális tárolás esetén.

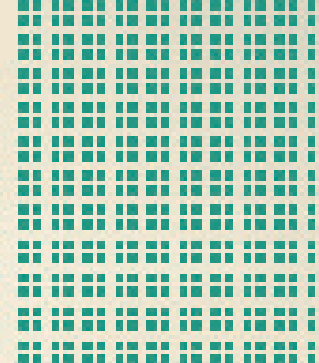
Irodalom

- [1] https://public.ek-cer.hu/~pressure/3hp2g/p2g_main_1.htm
- [2] https://public.ek-cer.hu/~pressure/1hp2g/p2g_main_1.htm
- [3] https://public.ek-cer.hu/~pressure/2hp2g/p2g_main_1.htm
- [4] https://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/sespm2
- [5] Csedő, Z.; Sinóros-Szabó, B.; Zavarkó, M. *Energies* 2020, 13, 4973.
- [6] Pintér, G., *Energies* 2020, 13, 6408.
- [7] Pörzse, G.; Csedő, Z.; Zavarkó, M., *Energies* 2021, 14, 2297.
- [8] Kummer, K.; Imre, A.R., *Energies* 2021, 14, 3265.
- [9] Szuhaj, M.; Wirth, R.; Bagi, Z.; Maróti, G.; Rákhely, G.; Kovács, K.L., *Energies* 2021, 14, 7336.



disruptive solutions
for utility-scale
energy storage,
grid balancing and
carbon reuse

www.p2g.hu



Technológiák és megoldások egy digitális és fenntartható világért

Biztos partner a megújuló energiák világában.

Technológiákat fejlesztünk és gyártunk, amelyek lehetővé teszik a hidrogén gáz betáplálását a földgázrendszerbe. A villamos energia gázzá történő átalakítása (Power-to-methane, Power-to-hydrogen) terén elért fejlesztési eredményeinknek köszönhetően a megújuló villamos energiatermelésből származó többletet felhasználhatjuk zöld hidrogén előállításához. Megújuló metánt tudunk létrehozni, mely biztonságosan szállítható a meglévő gázipari infrastruktúrán. A hidrogén és a földgáz összehangja ebben a technológiai alkalmazásban jelentősen hozzájárul az energia-átálláshoz, a metán pedig elősegíti a hidrogén technológiák fejlesztését.