

Főszerkesztő:

Dr. Gróf Gyula

Olvasó szerkesztő:

Dr. Groniewsky Axel

Szerkesztőség vezető:

Kaposvári Regina

Szerkesztőbizottság:

Dr. Balikó Sándor, Dr. Bihari Péter,
Czinege Zoltán, Dr. Csűrös 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. Stróbl 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, Műgyetem rkp. 3.

D épület 208 sz.

Telefon: +36 1 463 2613.

Telefax: +36 1 353 3894.

E-mail: enga@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.

bukiandras@t-online.hu

Nyomdai munkák:

EFO Nyomda

www.efonyomda.hu

TARTALOM • CONTENTS • INHALT

Dr. Birkner Zoltán: Előszó	2
Dr. habil. Csedő Zoltán: A power-to-gas technológia implementációs lehetőségei a hazai szennyvíztisztító telepeken <i>Opportunities of power-to-gas technology implementation at wastewater treatment plants in Hungary</i> <i>Möglichkeiten der Implementierung der Power-to-Gas-Technologie in Kläranlagen in Ungarn</i>	3
Somodi Gábor, Béni Tibor: Power-to-gas az E.ON-nál <i>Power-to-gas at E.ON</i> <i>Power-to-Gas bei E.ON</i>	8
Dr. Pintér Gábor, Hegedűsné Dr. Baranyai Nóra, Dr. Vincze András, Csányi Szilvia, Dr. Zsiborács Henrik: A fotovillamos termeléssel összekapcsolt power-to-gas technológia lehetőségei a Visegrádi országokban <i>Potentials of Power-to-Gas Technology Linked to Photovoltaic Power Plants</i> <i>in the Countries of the Visegrad Four</i> <i>Potenziäle der Power-to-Gas-Technologie in Verbindung mit Photovoltaik-Kraftwerken</i> <i>in den Ländern der Visegrad-Vier</i>	10
Zavarkó Máté: Power-to-gas, hálózatos innovációmenedzsment és versenyképesség a magyar energiaszektorban <i>Power-to-gas, network-based innovation management and competitiveness</i> <i>in the Hungarian energy sector</i> <i>Power-to-Gas, netzwerkbasieretes Innovationsmanagement und Wettbewerbsfähigkeit</i> <i>im ungarischen Energiesektor</i>	15
Dr. Domán Andrea, Hancz Aliz, Samantha K. Samaniego A., Prof. Dr. László Krisztina: Gáztárolás adszorpció elven? <i>Gas storage based on adsorption principle?</i> <i>Gasspeicherung nach dem Adsorptionsprinzip?</i>	21
Prof. Dr. Imre Attila, Kummer Kristóf: Szezonális és hosszútávú energiatárolási lehetőségek <i>Seasonal and long-term energy storage options</i> <i>Saisonale und langfristige Energiespeicheroptionen</i>	24
Dr. Csedő Zoltán, Dr. Imre Attila: Zárszó – A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia magyarországi helyzete 2020-ban <i>Conclusion – The situation of Power-to-Gas/Power-to-Methane technology</i> <i>in Hungary in 2020</i> <i>Fazit – Die Situation der Power-to-Gas/Power-to-Methane-Technologie</i> <i>in Ungarn im Jahr 2020</i>	31

A címlapon a világ jelenlegi legnagyobb, 1 MW teljesítményű biometanizációs üzeme Avedore-ban (Dánia), valamint egy laboratóriumi bioreaktor képe látható. Copyright: Electrochaea GmbH. A hátsó belső borítón a Power-to-Gas technológia általános koncepciója látható, Töröcsik Ágnek (REKK) konferencia-előadása alapján.

A beküldött kéziratokat nem őrizzük meg, és nem küldjük vissza. A szerkesztőség fenntartja a jogot a beküldött cikkek rövidítésére és javítására. A szakfolyóiratban megjelent cikkek nem feltétlenül azonosak a szerkesztők vagy az ETE vezetőségének álláspontjával, azok tartalmáért az írójuk felelős.

Lapunkat rendszeresen
szemlézi a megújult



www.observer.hu

Dr. Birkner Zoltán

elnök

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Az ezredfordulót követően az energiaipar jelentős kihívásokkal szembesült a megújuló energiaforrásokból származó villamos energia mennyiségének exponenciális növekedésének következtében. A fosszilis és nukleáris energiaforrások alkalmazásához szokott, és e téren jelentős tapasztalatokkal rendelkező iparág a korábban ismertektől jelentősen eltérő, új energiaforrásokkal találta szembe magát, melyek integrálása a meglévő villamosenergia-rendszerbe jelentős innovációt igénylő folyamatnak bizonyult. Ezzel összefüggésben az ezredfordulót követően kiemelkedő előrelépések történtek az energiaszektorban [1–3].

A világ és az Európai Unió tagállamaihoz hasonlóan Magyarország is egyre több megújuló energiaforrás kiaknázását kezdte meg. Igazodva az ország természeti sajátosságaihoz, először a biomassza jelent meg a hazai villamosenergia-rendszerben a nem időjárásfüggő megújuló energiaforrások közül. A szilárd biomassza tulajdonságai nagymértékben hasonlóak a szén jellemzőihez, így a korábbi széntüzeléses erőműveknek elegendő volt átállítani alapanyag ellátó rendszerüket szénről többnyire tűzifára. Tehát az iparág az alacsonyabb innováció igényű, gyors, ám korlátozott lehetőségeket (elsősorban korlátozott alapanyagot, biomasszát) tartogató megoldások felé fordult eleinte hazánkban. Az ezredfordulót követő első tíz évben a hazai villamosenergia-rendszer ily módon gyorsan és egyszerűen integrált nagymennyiségű nem időjárásfüggő megújuló energiaforrást viszonylag kismértékű innovációval [4].

Ezzel szemben a fejlett gazdaságú országok, Németországot és Kínát külön kiemelve az időjárásfüggő megújuló energiaforrások lehető legnagyobb mértékű rendszerbe integrálásán fáradoztak [5] [6] [7]. Itt már kiemelkedő, véleményem szerint a nukleáris energia villamosenergia-rendszerbe való integrálásához hasonló léptékű, innovációra volt szükség, hogy a villamosenergia-rendszer elbírja az időjárás-függőség miatti kilengéseket. Magyarország is igazodott a nemzetközi trendekhez, és robbanásszerűen terjedt a napenergia felhasználása (a szélenergia termelése az aktuális szabályozás miatt nem követte ezt a trendet), ami természetesen Magyarországon is kihívást jelentett a villamosenergia-rendszer rugalmasságára, sőt egyre inkább feszegette a biztonságos működés korlátait [8]. Az iparágban egyre inkább előtérbe került az az innováció igény, amit a kormány is felismert, és hatására létrehozta az Energetikai Innovációs Tanácsot, melynek több munkacsoportja is a hazai villamosenergia-rendszerben szükséges innovációval foglalkozik.

A fenti folyamatok és a hazai fosszilis tüzelőanyagokkal működő erőművek előregedésének következtében a hazai villamosenergia-rendszer egyensúlyának megtartása pusztán a jelenlegi kapacitásokkal egyre nehezebbé válik. Innováció és új technológiai megoldás bevonása szükséges, megjelent az igény az energiatárolásra [9–11]. A különféle energiatároló megoldások a hálózati rendszerek különböző pontjaiba építve különböző funkciókat tölthetnek be, így több szintű innovációt jelentenek. Az energiatárolási technológiák szélesebb körben való alkalmazása mind az EU-ban, mind Magyarországon elősegítheti az időjárásfüggő megújuló energiaforrások rendszerbe integrálását [12]. Emellett ma már nem az a kérdés, hogy szükséges-e a megtermelt villamos energia egy részét eltárolni, sokkal inkább az alkalmazandó tárolási technológia és a tárolókapacitás nagysága okoz dilemmát.

A power-to-gas technológia egy ígéretes jövőbeli energiatárolási megoldás lehet, ebben az ipari és tudományos szereplők véleménye megegyezik [13] [14]. Az Energetikai Innovációs Tanács Energiatárolási Munkacsoportjának elnökeként örömmel látom, hogy a power-to-gas technológia hazánkban is megjelent kutatása jelenleg is aktívan folyik, ahogy azt az Energiagazdálkodás folyóirat immár második power-to-gas különszámában felsorakozott tanulmányok is mutatják.

Források:

1. Cucchiella, F.; D'Adamo, I. A Multicriteria Analysis of Photovoltaic Systems: Energetic, Environmental, and Economic Assessments. *Int. J. Photoenergy* 2015, 2015, 1–8, doi:10.1155/2015/627454.
2. D'Adamo, I.; Miliacca, M.; Rosa, P. Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Int. J. Photoenergy* 2017, 2017, 1–6, doi:10.1155/2017/4184676.
3. Daliento, S.; Chouder, A.; Guerriero, P.; Pavan, A.M.; Mellit, A.; Moeini, R.; Tricoli, P. Monitoring, Diagnosis, and Power Forecasting for Photovoltaic Fields: A Review. *Int. J. Photoenergy* 2017, 2017, 1–13, doi:10.1155/2017/1356851.
4. Hartmann, B.; Börcsök, E.; Groma, V.O.; Osán, J.; Talamon, A.; Török, S.; Alföldy-Boruss, M. Multi-criteria revision of the Hungarian Renewable Energy Utilization Action Plan – Review of the aspect of economy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 80, 1187–1200.
5. Rodríguez, R.A.; Becker, S.; Andresen, G.B.; Heide, D.; Greiner, M. Transmission needs across a fully renewable European power system. *Renew. Energy* 2014, 63, 467–476, doi:10.1016/J.RENENE.2013.10.005.
6. Bertsch, J.; Growitsch, C.; Lorenczik, S.; Nagl, S. Flexibility in Europe's power sector — An additional requirement or an automatic complement? *Energy Econ.* 2016, 53, 118–131, doi:10.1016/J.ENERCON.2014.10.022.
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. Hungarian Transmission System Operator - MAVIR ZRt. PV power generation, estimation and fact data.
9. Fülöp Miklós Működik az első hazai közcélú energiatároló egység. *Villany szerelők Lapja* 2018.
10. Igazságügyi Minisztérium. *Magyar Közlöny*, 2019. évi 222. szám; Budapest, 2019;
11. Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság (MAVIR ZRt.). *A magyar VER fogyasztói és forrásoldali jövőképe 2020-2040 - Input adatok*; Budapest, 2020;
12. Pintér, G.; Hegedűsné Baranyai, N.; Zsiborács, H. Okos Energia az Okos Városokban. *Lépések a fenntarthatóság felé* 2019, 2019, 1–28.
13. Bailera, M.; Lisbona, P.; Romeo, L.M.; Espatolero, S. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 69, 292–312.
14. 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.

A power-to-gas technológia implementációs lehetőségei a hazai szennyvíztisztító telepeken

Dr. habil. Csedő Zoltán

*tanszékvezető egyetemi docens, Budapesti Corvinus Egyetem, Vezetés és Szervezés Tanszék;
üzgyvezető igazgató, Power-to-Gas Hungary Kft., csedo@p2g.hu*

A megújuló energiák integrációját és a dekarbonizációt is támogató power-to-gas (P2G) technológiák ipari léptékű implementációja a nemzetközi trendek, a magyarországi energiapolitikai célok, az infrastrukturális adottságok és a meglévő K+F+I tapasztalat alapján szükségesnek és lehetségesnek látszik. A Power-to-Gas Hungary Kft. innovatív biológiai metanizációs technológiájának hazai implementációs lehetőségeivel foglalkozó empirikus kutatás alátámasztotta a nemzetközi szakirodalom azon megállapításait, miszerint a nagyobb hazai szennyvíztisztító telepek kulcsszerepet játszhatnak a P2G által a villamosenergia- és földgázrendszerek közötti kapcsolat megteremtésében és a szezonális energiatárolásban, de a folyamat dekarbonizációs hatása is figyelemre méltó. A kutatási eredményeink alapján a világ élvonalába tartozó P2G technológia Magyarországon ipari méretben is implementálható, azonban e műszaki, gazdasági és környezeti szempontból is kedvező lehetőség kihasználásához az érintettek együttműködésére és – a technológiai fejlesztésekkel egyidejűleg – a támogató szabályozói környezetre is szükség van.

*

The grid-scale implementation of the power-to-gas (P2G) technologies that supports renewable energy integration and decarbonization seems necessary and possible based on the international trends, Hungarian energy policies, energy infrastructure opportunities, and already existing local R&D&I experience. Our empirical research focusing on the innovative biomethanation technology of Power-to-Gas Hungary Kft. confirmed literature suggestions according to which wastewater treatment plants (WWTPs) with P2G could play a crucial role in sector coupling and seasonal energy storage, with the notable decarbonization potential of the process, as well. Results show that the globally outstanding P2G technology can be implemented in grid-scale in Hungary. The exploitation of this technically, economically and environmentally favorable opportunity, however, needs the cooperation of diverse stakeholders and a supporting regulatory environment, in-line with the technological progress.

Az Európai Unió hosszú távú, klímasemlegességet célzó stratégiájának részeként az üvegházhatású gázok kibocsátására vonatkozó 55%-os csökkentési cél 2030-ra szükségessé teszi a megújuló energiatermelés 38-40%-os részarányának elérését [1, 2]. Az EU-szintű célokhoz hozzájárulva, a megújuló energiatermelő kapacitások növelése Magyarországon elsődlegesen a fotovoltaiikus energiára fókuszálva zajlik [3], mely az egyik legígéretesebb alternatíva a környezeti kihívások egy részének kezelésére [4]. A Nemzeti Energiastratégia 2030-ra már több mint 6.000 MW beépített fotovoltaiikus kapacitással számol, és célként fogalmazza meg a dekarbonizációt

is [5]. Széles körben ismert az az összefüggés, hogy a megújuló energiatermelés változékonyságának következtében vannak olyan időszakok, amikor a megújuló energiatermelés jóval meghaladja az aktuális energiakeresletet, de ezen többlet villamos energia által generált hálózati integrációs kihívás a különböző energiatárolási megoldásokkal kezelhető (lesz) [6, 7]. Számos tanulmány rámutatott a power-to-gas (P2G) technológiák által biztosítható rugalmassági és hosszú távú, szezonális energiatárolási potenciálra [8, 9, 10], amely a friss EU-szintű elemzések alapján releváns lesz a következő évtizedekben, mind a flexibilitást nyújtó elektrolizátorok (Power-to-Hydrogen – P2H), mind a jelenlegi földgázinfrastruktúra által kínált tárolási kapacitás kihasználására alkalmas metanizációs (Power-to-Methane – P2M) technológiák esetében [11]. Figyelembe véve a magyarországi földgázrendszer 6,33 milliárd m³-os kapacitását [5], érdemes a kiegyensúlyozott villamosenergia-hálózatot, a megújuló energiahasznosítás nagyobb léptékű integrációját, a szezonális energiatárolási potenciál kihasználását és még a dekarbonizációs törekvéseket is elősegítő P2G üzemek telepítésének konkrét lehetőségeit megvizsgálni Magyarországon [12].

A P2G üzemek telepítésének vizsgálata annál is inkább releváns hazánkban, mivel a nemzetközi P2G fejlesztési tapasztalatok alapján az ipari szintű alkalmazás nemcsak lehetséges, de már több esetben meg is valósult [13]. Hazai szinten továbbá a Power-to-Gas Hungary Kft. két éve üzemelteti innovatív biológiai metanizációs prototípusát kutatás-fejlesztési céllal, melynek során demonstrálta a technológia működőképességét, és kiépítette a ipari méretű üzemeltetés megkezdéséhez szükséges know-how bázist. A Power-to-Gas Hungary Kft. célja, hogy a megújuló hasznosításának kihívásaira piacépes megoldást nyújtson Magyarországon és Közép-Kelet-Európában, melynek érdekében a P2H és a P2M szegmensre is kiterjedő, ipari méretű P2G technológia fejlesztésén és implementálásán is dolgozik. A társaság az ipari K+F tevékenység mellett tudományos kutatásokat is végez a P2G technológia műszaki, gazdasági és üzletfejlesztési aspektusai vonatkozásában.

Kutatási keretrendszer

A szakirodalom az utóbbi években aktívan foglalkozik a P2G technológiák fejlesztési és implementációs lehetőségeivel, továbbá az energiarendszerre gyakorolt várható hatásaival. A főbb témák közé sorolható például

- a) a P2G technológia ígéretes szerepének vizsgálata a hosszú távú energiatárolás területén, főleg műszaki és gazdasági szempontokat figyelembe vevő rendszerelemzések által [9, 8, 14];
- b) a P2G technológiák műszaki-gazdasági vizsgálata, a befektetési költségekre, az üzemeltetési költségekre vagy a klímapolitikai szempontokra fókuszálva [15, 16, 17];
- c) a P2G technológiák alkalmazási lehetőségei egy konkrét

kontextusban, melyek egyik irányába a szennyvíztisztító telepek és a P2G technológia kapcsolatát vizsgáló kutatások tartoznak, például a metán előállítását, az oxigén melléktermék felhasználását, a hálózat-kiegyensúlyozást és/vagy az energiatárolást a középpontba helyezve [18, 19, 20].

E nemzetközi kutatásokhoz igazodva, a P2G implementációs lehetőségeinek kutatását magyarországi kontextusba helyezve egyrészt a műszaki-gazdasági szempontokat kell figyelembe venni. Jelen kutatási keretek között a P2G szennyvíztisztító telepeken történő alkalmazásával biztosítható szezonális energiatárolás és a szén-dioxid-hasznosítás kerül a középpontba. A nemzetközi kutatások eddig kevésbé vették figyelembe a P2G implementációját a gyakorlatban egyértelműen meghatározó azon kereskedelmi és befektetési szempontokat, amelyek a potenciális P2G üzemeltetőkhez köthetők. A fenntarthatósági célok alapján a társadalmi és ökológiai szempontok szintén relevánsak [21, 22]. A természettudományos és műszaki K+F+I tevékenységekhez szükséges ráfordítások mértéke továbbá növekvő tendenciát mutatott az elmúlt évtizedben [23]. Tehát a P2G technológia fejlesztéshez és implementációhoz kapcsolódó pénzügyi befektetéssel és megtérüléssel is foglalkozni kell. E kutatási rést is betöltve, továbbá a magyarországi kontextust is figyelembe véve szükséges meghatározni a kutatás kérdéseit és módszertanát.

Mint az a bevezetésben említésre került, a magyarországi gáztárolási kapacitás alkalmasnak bizonyulna a szezonális energiatárolásra, illetve, a Nemzeti Energiastratégia 2030 fontos célja az energiatermelés dekarbonizálása. Ha ezt összevetjük az eddigi hazai és nemzetközi P2G kutatások tanulságaival, a következő kérdéseket kell megválaszolnunk:

- 1) Megfelelő-e a műszaki infrastruktúra a P2G általi energiatároláshoz a magyarországi szennyvíztisztító telepeknél?
- 2) Mekkora a P2G technológiával biztosítható szezonális energiatárolási potenciál a szennyvíztisztító telepeknél?
- 3) Mennyi szén-dioxid köthető meg metántermelési célra P2G technológiával a szennyvíztisztító telepeknél?
- 4) Milyen gazdasági és egyéb üzemeltetési szempontok merülnek fel a P2G szennyvíztisztító telepeknél történő implementációjával kapcsolatban?

Anyagok és módszerek

A kutatási kérdések megválaszolása egyrészt a Power-to-Gas Hungary Kft. prototípusának felépítésére és üzemeltetési tapasztalataira épül. A technológia olyan elemekből áll, amelyek már ipari környezetben is bizonyítottan alkalmazhatóak. A technológia egyik eleme a PEM elektrolízis, amely rugalmasan képes alkalmazkodni a volatilis megújuló villamos-energiatermeléshez [24]. A technológia másik eleme a szabadalmaztatott mikroorganizmussal (*Methanothermobacter thermautotrophicus*) működő biológiai metanizációs megoldás, mely szintén rendkívüli rugalmasságot képes biztosítani, továbbá a prototípus adatai alapján a rendszer nemcsak rugalmas, de robusztus is. A biológiai metanizáció konverziós hatékonysága 99% feletti is lehet, és különböző kísérletek (például leállítások, újraindítások, tápanyagok módosítása) mellett is magas konverzió volt tapasztalható. Egy 2018-as kísérletsorozat esetében például átlagosan 94%-os volt konverzió [25]. A kutatás egyik pillére tehát a Power-to-Gas Hungary Kft. 2018 áprilisa óta végzett több mint 30.000 mérése, illetve a P2G folyamat hatékony megvalósításához szükséges inputanyagok, üzemeltetési know-how és infrastrukturális igények ismerete volt. A kutatás így az olyan

P2G üzemek implementációjára vonatkozott, amelyek három lépést valósítanak meg:

- 1) Hidrogéntermelés: a (többlet) villamos energia felhasználása elektrolízishez
- 2) Metántermelés: a szennyvíztelepnél termelt biogáz betáplálása a bioreaktorba a hidrogénnel együtt, melynek eredményeként metán keletkezik a következő reakció szerint [26]:

$$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$$
- 3) Betáplálás a földgázhálózatba: a termék-gáz a hidrogén leválasztása, a vízgőz eltávolítása és hűtés után 97%-os metántartalmával és egyéb paramétereivel megfelel a földgázhálózatba való betáplálás hazai feltételeinek [27].

Az elektrolízis során melléktermékként oxigén, továbbá az elektrolízis és a metanizáció lépésekben is hulladékhő keletkezik. Ezek felhasználási lehetőségei is relevánsak a szennyvíztelepeknél, az oxigén által például a szennyvíztisztítási folyamat hatékonysága növelhető [19].

A kutatás másik adatforrása a magyarországi szennyvíztisztító üzemeknél történt adatgyűjtés, mely három csoportra oszlott:

- a) Műszaki adatgyűjtés: 7 db üzemnél történt adatgyűjtés, 4 régióban. Az üzemek mindegyike 100.000 lakosegységnél (LE) feletti, és mindegyik termel biogázt. Utóbbi feltétel azért kritikus, mert a – külföldi üzemekhez hasonlóan – az ipari P2G folyamatban a szennyvíztisztító telepeknél a megtermelt biogáz szolgálja a metanizáció szén-dioxid forrása-ként, azaz az elektrolízis eredményeképp létrejött hidrogén mellett a biogáz kerül(ne) bevezetésre a metanizációs reaktorba. E két gáz reakcióját katalizálja a mikroorganizmus, melynek eredményeként biometán termelődik.
- b) Felsővezetői és szakértői interjúk készítése: Stratégiai és általános műszaki kérdések egyeztetésére került sor.
- c) Helyszíni adatgyűjtés és konzultációk: A műszaki megvalósíthatóság elemzése, az infrastrukturális csatlakozások, lehetőségek feltárása szintén kutatási feladat volt.

Az 1. táblázat azt mutatja, hogy az adatgyűjtés során a kvantitatív és kvalitatív adatok, illetve a műszaki, gazdasági és a stratégiai információk is fontosak voltak.

A megfelelő adottságokkal rendelkező szennyvíztisztító telepeken realizálható szezonális energiatárolás potenciáljának, továbbá ezek gazdasági vonzatainak kiszámítása a szakirodalmi megállapításokra épülő saját modellekre épült, amelyek nemzetközi szinten publikálásra is kerültek [27]. Az interjúkon szerzett kvalitatív adatok strukturált kódolási folyamattal és az elmélettel iterálva kerültek feldolgozásra, így az adatelemzés lehetővé tette az általánosabb következtetések megfogalmazását is [28].

Eredmények

1) Telepítési potenciál a műszaki adottságok alapján

Az első kutatási kérdés arra vonatkozott, hogy mennyiben felelnek meg a vizsgált szennyvíztisztító telepek a műszaki infrastruktúra szempontjából arra, hogy a közelben ipari méretű P2G üzem épüljön. A vizsgált szennyvíztelepek biogáztermelési adatai alapján az átlagosan lehetséges üzemméret 1 MWel, amely megegyezik a világ eddigi legnagyobb biológiai metanizációs üzemével (Dánia, Avedøre) [13]. Mivel a Power-to-Gas Hungary Kft. prototípusának struktúrája megegyezik a dániai üzemével [29], a világ élvonalába tartozó P2G technológia Magyarországon is ipari méretben implementálható. Empirikus vizsgálataink alapján nemcsak a biogáz

1. táblázat: A szennyvíztisztító telepeknél végzett adatgyűjtés témái

Adatok	Műszaki adatok, rendelkezésre álló infrastruktúra	Gazdasági adatok, fejlesztési és befektetési lehetőségek
Általános (Vezérigazgatói/Ügyvezetői és igazgatói szint)	- Villamosenergia-ellátás hálózatról, a jelenleg meglévő vagy tervezett fotovoltaikus kapacitásokról - Vízellátás - CO₂ input: százalékos érték a biogázban, termelt mennyiség óránként - A P2G üzem telepítési helye és a helyi infrastrukturális kapcsolódási pontok - Csatlakozás a földgázrendszerhez - Melléktermékek hasznosításának potenciálja	- Nyitottság a technológiai innovációk és együttműködések felé - Pénzügyi helyzet - Jelenlegi biogáz felhasználás - Jelenleg folyó vagy tervezett infrastrukturális fejlesztések, potenciális szinergiák a P2G technológiával
Specifikus (igazgatói és szakértői szint)	- Fermentáció - Nyers biogáz összetétel - Gáztulajdonságok - Gázmotorok műszaki tulajdonságai - Villamosenergia-hálózathoz történő csatlakozás - Földgázrendszerhez történő csatlakozás - Vízellátás és szennyvíz elvezetése - Technológiai és infrastrukturális kapcsolatok - Bővítési potenciál	- Befektetésekre mozgósítható tőke - Az energiaköltségeket meghatározó jelenlegi szerződések - Jelenleg termelt árbevétel vagy a biogáz használatával megspórolt költségek

mennyisége, de az infrastruktúra (kiemelten: kapcsolódás a földgázrendszerhez) és a szükséges terület is rendelkezésre áll a vizsgált szennyvíztisztító telepeknél egy 1 MW_{el} üzem felépítésére. Egy ekkora üzemmel óránként 50 Nm³ biometán termelhető. Mivel kutatásaink alapján kb. 20 olyan magyarországi szennyvíztisztító üzem van, amely kedvező infrastruktúrát biztosíthat a biometanizációs megoldással működő P2G-hoz, illetve biogáz előállításával is foglalkozik, ez összesen kb. 20 MW_{el} telepítési potenciált jelent Magyarországon.

2) Szezonális energiatárolási potenciál

A második kérdés arra vonatkozott, hogy mekkora a szezonális energiatárolási potenciál a szennyvíztelepeknél, amely az előző pontban megállapított P2G telepítési potenciál alapján volt kiszámítható. A szezonális energiatárolásra fókuszálva, évi 1.200 órában, 20 szennyvíztelepre vonatkoztatva, a teljes szezonális energiatárolási potenciál 11,7 GWh. Ezt a mennyiséget tágabb kontextusban például a Nemzeti Energiastratégia alapján értelmezhetjük, amely célként tűzte ki az országos földgázfogyasztás lecsökkentését 8.700.000.000 m³-re (kb. 2.550 GWh) 2030-ig. A 11,7 GWh ennek az elérni kívánt, csökkentett földgáz fogyasztásnak kb. 0,5%-át teszi ki. Mindez végfogyasztói szempontból közelítve kb. 5.400 háztartás éves energiafogyasztásának felel meg [30].

3) Dekarbonizációs potenciál

Harmadrészt azt vizsgáltuk, hogy mennyi szén-dioxid köthető meg metántermelési célra P2G technológiával a szennyvíztisztító telepeknél. Mivel egy 1 MW_{el} üzem évi 1.200 órában kb. 125 tonna szén-dioxidot alakít át metánná, 20 db 1 MW_{el} üzem a szennyvíztisztító telepeknél, csak a szezonális energiatárolás során kb. évi 2.500 tonna szén-dioxidot köt meg. Nemcsak szezonális energiatárolás által, hanem folyamatos üzemben (kb. 8.000 óra) ez több mint évi 16.500 tonna szén-dioxid is lehet, amely kb. 3.600 személygépjármű éves szén-dioxid-kibocsátásával egyezik meg [31].

4) Gazdasági és egyéb üzemeltetési szempontok

A negyedik kérdés esetében a gazdasági és a potenciális üzemeltetők szempontjai kerültek előtérbe. Ezzel kapcsolatban a szakirodalom rámutatott, hogy egyre több országban a biometán termelését meglehetősen magas kötelező átvételi ár bevezetésével támogatják

(pl. Hollandia: 97,5 EUR/MWh; Franciaország: 129,7 EUR/MWh; Egyesült Királyság: 70 EUR/MWh; Olaszország: 150 EUR/MWh [32]), amely figyelemre méltó árbevétel-potenciált vetít előre. Például a 150 EUR/MWh ár esetében, csak a szezonális energiatárolásra fókuszálva (1.200 óra), a 20 db 1 MW_{el} teljesítményű P2G üzemmel a nagyobb szennyvíztisztító telepeknél éves szinten generálható teljes árbevétel kb. 625.000.000 HUF lenne.

A beruházási költségek esetében egy 2018-as elemzés [33] azt állapította meg, hogy a tanulási görbéknek és a méretgazdaságságnak köszönhetően

- a PEM elektrolizátor rendszer befektetési költsége 1.200 EUR/kW_{el}-ről (2017) várhatóan 530 EUR/kW_{el}-ra (2030),
- míg a biológiai metanizáció befektetési költsége 600 EUR/kW_{SNG}-ról (2017) 360 EUR/kW_{SNG}-ra (2030) fog csökkenni.

Ez azt jelenti, hogy ezen fő alkotóelemek beruházási költsége várhatóan 45-55%-kal csökken 13 év alatt, így gazdasági szempontból is érdemes foglalkozni a P2G üzemek telepítésével. Az EU által finanszírozott, három különböző P2G fejlesztést tartalmazó STORE&GO projekt adatait alapul véve [34], egy 1 MW_{el} teljesítményű P2H+P2M üzem kialakításának befektetési költsége egy átlagos szennyvíztisztító telepen kb. 5.696.000 EUR (kb. 2 milliárd HUF) lett volna 2020-ban, azonban a fenti előrejelzés alapján ez beruházási költség 2025-ben már várhatóan csak 4.806.000 EUR (kb. 1,7 milliárd HUF) lesz.

Végül, a potenciális P2G üzemeltetők szempontjait is szükséges figyelembe venni. A szennyvíztisztító telepek alapvető stratégiai prioritásai között az alábbi főbb elemeket tudtuk azonosítani: stabilitás, körülmények kockázatkezelés, hatékony működtetés, a fenntartható megoldások alkalmazása és az energiahatékonyság növelése. Implementációs szempontból kedvező tényező, hogy egy alapvető nyitottság volt észlelhető a felsővezetők részéről az energetikai innovációk felé, mivel felelős vállalként (és felelős vezetőkként) a fenntarthatósághoz történő hozzájárulás is [35] fontos szempont a stratégiai döntéseikben. A stratégiai prioritások közé tartozó körülmények kockázatkezelés miatt azonban fontos számukra, hogy egy új technológia pilot alkalmazásának tapasztalatai Magyarországon is rendelkezésre álljanak. Ez egy olyan feltétel, amely rövid távon is teljesülhet, ugyanis egy pilot projekt a Nemzeti Energiastratégia

2030 alapján (is) megvalósulhat, és így rendelkezésre fog állni nemcsak hazai K+F+I, de ipari üzemeltetési tudás is Magyarországon. A szakértői interjúk arra is rávilágítottak, hogy a P2G üzem és a szennyvíztelep biometán-termelésen túli kapcsolataiban is van szinergia-potenciál, figyelembe véve például, hogy oxigénből egy 1 MW_{el} P2G üzem 100 Nm³-t termel óránként, és ezen oxigén hasznosítása a szennyvíztisztítási folyamatban valóban kivitelezhető.

Következtetések

A nemzetközi P2G projektek tanulságai alapján ebben a szegmensben olyan szervezeti határokon átívelő innovációról beszélhetünk, amelyben kulcsfontosságúak (1) a technológiafejlesztők innovatív alapmegoldásai, (2) az egyetemek és kutatóközpontok K+F kapacitásai, (3) a nagy energetikai vállalatok iparági tudása és infrastruktúrája, illetve (4) az állami szféra pénzügyi támogatása és a szabályozói környezet kedvező alakulása is [36]. E megállapítást újabb eredményeink alapján azzal tudjuk kiegészíteni, hogy ebben az együttműködő szervezeti hálózatban figyelembe kell venni a potenciális P2G üzemeltetők adottságait és szempontjait is. Jelen kutatásunk alapján az is megállapítást nyert, hogy a P2G technológia – a nemzetközi szakirodalom alapján megfogalmazott várakozásokkal összhangban – valóban komoly lehetőséget jelent a nagyobb magyarországi szennyvíztisztító telepeknél a regionális, decentralizált, szezonális energiatárolásra, a dekarbonizációra illetve a villamosenergia- és földgázrendszerek közötti kapcsolat megteremtésére.

Eredményeinket egy „átlagos” szennyvíztisztító üzem kontextusában értelmezve, a P2G technológia implementálásához és a szezonális energiatároláshoz megfelel a vizsgált szennyvíztisztító üzemek infrastruktúrája és biogáztermelése. Egy standardizált, 1 MW_{el} teljesítményű P2G üzem a legtöbb helyen alkalmazható lenne és ez összhangban van a P2G jelenlegi technológiai fejlettségi szintjével is. Olyan szinergiák realizálhatók továbbá a szennyvíztisztító telepeken, amelyek hozzájárulhatnak a telepek energiahatékonyságának növeléséhez (elsősorban az oxigén melléktermék felhasználásával), és mindemellett egy alapvető felsővezetői nyitottság, fogadókészség azonosítható az innováció – hazai K+F+I és üzemeltetési tapasztalatok alapján történő – alkalmazására.

Az eredmények országos szintre történő kiterjesztésével látható, hogy a nagyobb magyarországi szennyvíztisztító telepek teljes potenciálja 20 MW_{el} körüli tehető, ami 11,7 GWh szezonális energiatárolási potenciált jelent. Csak a szezonális energiatárolás során évi 2.500 tonna szén-dioxid, folyamatos üzemben akár 16.500 tonna alakítható metánná e 20 üzemmel. Kedvező tényező, hogy rendelkezésre állnak a szükséges infrastrukturális kapcsolódási feltételek (kiemelten a földgázrendszerhez) a szennyvíztelepeknél, lehetséges a villamosenergia- és földgázrendszerek közötti kapcsolat megteremtése. Végül érdemes megjegyezni, hogy a szezonálisan eltárolt energia közvetlen értékén kívül is vannak egyéb pozitív externáliái a P2G implementációnak, ideértve például a megújuló energiatermelés nagyobb fokú integrációját, vagy a villamosenergia-hálózat kiegyensúlyozatlan terhelésének és a kapcsolódó karbantartási költségek felmerülésének megelőzését.

Gazdasági szempontból vizsgálva a P2G implementációs lehetőségeket, a beruházási költségek várt csökkenése miatt a projektek tervezését is már most érdemes megkezdeni. Ehhez azonban egy szabályozói tesztkörnyezetnek („regulatory sandbox”) is társulnia érdemes, ugyanis a P2G folyamat műszakilag már ipari méretben alkalmazható, de szabályozási szempontból viszont még

újdonságot jelent. A szabályozás terén olyan általános szabályozói kérdések megválaszolása is szükséges még, mint például a P2G technológia jellegének tisztázása (energiatárolás és/vagy gáz előállítás), mivel ezek mind hatással vannak a gazdasági teljesítményre. Szabályozási kérdés lehet továbbá a bevételi oldalon a biometán átvételi ár, a rugalmassági szolgáltatások és az energiatárolás díjazása; a kiadási oldalon pedig a kedvezményes többlet villamosenergia vételezés lehetősége merül fel. Figyelembe véve, hogy 2019-ben globálisan már több mint 50 szabályozói tesztkörnyezet kialakítása valósult meg/volt tervben különböző szektorokban, például a telekommunikáció, az adatvédelem és a környezetvédelem területén [37], továbbá, hogy energetikai „regulatory sandbox” modellt is hoztak már létre például Szingapúrban és Hollandiában [38, 39], Magyarországon is ígéretesnek tűnik az ipari léptékű P2G üzemek felé történő műszaki lépések összekapcsolása a szabályozói lépésekkel.

A fentiek alapján, műszaki, gazdasági és szabályozói szempontból is a Magyarországon megvalósítható P2G modell illeszkedik a nyugat-európai trendekhez, az innovatív technológia implementációjához pedig az érintettek együttműködésére van szükség. Kutatásunk fő konklúziója, hogy a szennyvíztisztító üzemek kulcsszerepet játszhatnak a P2G által a villamosenergia- és földgázrendszerek közötti kapcsolat megteremtésében és a szezonális energiatárolásban Magyarországon. Fontos ugyanakkor azt is látni, hogy ez még mindig csupán egyetlen lehetséges szegmense a P2G fejlesztésének és kutatásának. Ígéretesnek tűnik ugyanis a mezőgazdasági biogáz üzemeknél történő implementáció is, ahol felmerülhet a metán cseppfolyósítása is (LNG) a hasznosítási lehetőségek bővülésével [40], ha nincs csatlakozási lehetőség a földgázrendszerhez. A Carbon Capture technológiák fejlődése várhatóan még nagyobb rugalmasságot fog biztosítani a telephelyválasztáshoz. Amint arra korábban utaltuk, a P2G implementáció nemcsak a szűken értelmezett szezonális energiatárolásban teremthet értéket, így a P2G egyéb pozitív externáliáinak kvantifikálása nemzetgazdasági szinten még szintén releváns kutatási iránynak tűnik.

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.

Hivatkozásjegyzék

- [1] Európai Bizottság, „Report From The Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Renewable Energy Progress Report,” Brüsszel, 2020.10.14..
- [2] L. Berényi, Z. Birkner és N. Deutsch, „A Multidimensional Evaluation of Renewable and Nuclear Energy among Higher Education Students,” Sustainability, 12, p. 1449. <https://doi.org/10.3390/su12041449>, 2020.
- [3] G. Pintér, H. Zsiborács, N. Hegedűsné Baranyai, A. Vincze és Z. Birkner, „The Economic and Geographical Aspects of the Status of Small-Scale Photovoltaic Systems in Hungary—A Case Study,” Energies, 13, p. 3489. <https://doi.org/10.3390/en13133489>, 2020.
- [4] A. M. Ahmed, L. Kondor és A. R. Imre, „Thermodynamic Efficiency Maximum of Simple Organic Rankine Cycles,” Energies, 14 (2), p. 307. <https://doi.org/10.3390/en14020307>, 2021.
- [5] ITM, Nemzeti Energiastratégia 2030, 2020.
- [6] 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 Sys-

- tems," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 11, pp. 3-14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.21>, 2016.
- [7] 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.
- [8] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert és T. Kolb, „Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review,” *Renewable Energy*, 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>, 2016.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Európai Bizottság, „Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe,” Brüsszel, 2020. március.
- [12] 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.
- [13] M. Zavarkó, „Nemzetközi power-to-gas technológia fejlesztési projektek tanulságai,” *Energiagazdálkodás*, 60 (Különszám), pp. 21-25, 2019.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] P. Collet, E. Flottes és e. al., „Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology,” *Applied Energy*, p. 282-295. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.181, 2017, 192.
- [18] A. Ceballos-Escalera, D. Molognoni, P. Bosch-Jimenez, M. Shahparasti, S. Bouchakour, A. Luna, A. Guisasaola, E. Borrás és M. Della Pirriera, „Bioelectrochemical systems for energy storage: A scaled-up power-to-gas approach,” *Applied Energy*, 260, p. 114138. doi:10.1016/j.apenergy.2020.
- [19] 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.
- [20] O. Gretzschel, M. Schäfer, H. Steinmetz, E. Pick, K. Kanitz és S. Krieger, „Advanced Wastewater Treatment to Eliminate Organic Micropollutants in Wastewater Treatment Plants in Combination with Energy-Efficient Electrolysis at WWTP Mainz,” *Energies*, 13(14), p. 3599. <https://doi.org/10.3390/en13143599>, 2020.
- [21] R. Adnan Al Danaf és S. Berke, „CSR Leadership,” in Koponicsné Györke, D.; Barna, R. (eds.): *Proceedings of the International Conference on Sustainable Economy and Agriculture*, Kaposvár, Magyarország, Kaposvár University, Faculty of Economic Science, 2020, pp. 389-398.
- [22] G. Kocziszy és M. Veresné Somosi, „Közösségi tulajdonú (nem pénzügyi) gazdasági társaságok fenntarthatóságának vizsgálata,” *Pénzügyi Szemle*, 65 (Különszám), pp. 44-76. https://doi.org/10.35551/PSZ_2020_k_1_3, 2020.
- [23] G. Kocziszy, M. Veresné Somosi és K. Balaton, „A társadalmi innováció vizsgálatának tapasztalatai és fejlesztési lehetőségei,” *Vezetéstudomány*, 48 (6-7), pp. 15-19. <https://doi.org/10.14267/VEZ-TUD.2017.06.02>, 2017.
- [24] IRENA, „Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition,” Abu Dhabi, 2018.
- [25] B. Sinóros-Szabó, M. Zavarkó, F. Popp, P. Grima és Z. Csedő, „Biomethane production monitoring and data analysis based on the practical operation experiences of an innovative power-to-gas benchscale prototype,” *Acta Agraria Debreceniensis*, 150, pp. 399-410, 2018.
- [26] J. G. Ferry, „Enzymology of one-carbon metabolism in methanogenic pathways,” *FEMS Microbiology*, 23, pp. 13-38. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1999.tb00390.x>, 1998.
- [27] 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.
- [28] B. Glaser és A. Strauss, *The Discovery of Grounded theory: Strategies for Qualitative Research*, Chicago: Aldine, 1967.
- [29] B. Sinóros-Szabó, „Egy power-to-gas prototípus üzemeltetési tapasztalatai: K+F+I eredmények és lehetőségek,” *Energiagazdálkodás*, 60 (különszám), pp. 3-7, 2019.
- [30] NKM, „Átlagos éves fogyasztás,” 2020. [Online]. Available: <https://www.nkmenegia.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=550565>. [Hozzáférés dátuma: 15 09 2020].
- [31] EPA - United States Environmental Protection Agency, „Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle,” 2018. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>. [Hozzáférés dátuma: 07 01 2021].
- [32] S. Koonaphapdeelert, P. Aggarangsi és J. Moran, *Biomethane Production and Applications*, Singapore: Springer, 2020.
- [33] H. Böhm, A. Zauner, S. Goers, R. Tichler és P. Kroon, „Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimization - D7.5. Report on experience curves and economies of scale,” *STORE&GO Project*, 2018.
- [34] STORE&GO Project, „Results and publications of the project,” 2021. [Online]. Available: <https://www.storeandgo.info>. [Hozzáférés dátuma: 07 01 2021].
- [35] S. Berke és G. Tóth, „Felelős vállalat vagy 'csak' felelős vezető?,” *Lépések: A fenntarthatóság felé*, 25 (1), pp. 14-15, 2020.
- [36] M. Zavarkó, „Power-to-Gas Technology Development: Innovation Management Beyond Organizational Boundaries,” in Pintér, Gábor; Csányi, Szilvia; Zsiborács, Henrik (szerk.): *Innovációs kihívások a XXI. században : LXI. Georgikon Napok konferenciakötete*, Keszthely, Magyarország, Pannon Egyetem Georgikon Kar, 2019, pp. 543-552..
- [37] A. Martin és G. Balestra, „Using Regulatory Sandboxes to Support Responsible Innovation in the Humanitarian Sector,” *Global Policy*, 10 (4), pp. pages 733-736. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12729>, 2019.
- [38] E. van der Waal, A. Das és T. van der Schoor, „Participatory Experimentation with Energy Law: Digging in a 'Regulatory Sandbox' for Local Energy Initiatives in the Netherlands,” *Energies*, 13, pp. pages 458-479. <https://doi.org/10.3390/en13020458>, 2020.
- [39] Energy Market Authority, „Regulatory Sandbox,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ema.gov.sg/Sandbox.aspx>. [Hozzáférés dátuma: 07 01 2021].
- [40] 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.

Power-to-gas az E.ON-nál

Somodi Gábor

E.ON Gázhálózati Vezérigazgató

Béni Tibor

E.ON Hálózati innovációs szakreferens

Számos tanulmány foglalkozik az energiarendszer fejlesztésével, de az elemzések többségében közös, hogy a gázra, mint energiahordozóra szükség van. Hosszútávon a megújulókat részaránya igen magas lesz, ugyanakkor a földgáz, mint tüzelőanyag körülbelül 22%-ban lesz jelen a tervek szerint az EU28 végső energiamixében 2050-ben.

*

There are many studies on the development of the energy system, but it is common to conclude that natural gas – as an energy source – cannot be phased out. The share of renewables will be very high in the long term, while the share of natural gas as fuel is projected to be around 22% of the EU28 final energy mix in 2050.

A földgázhálózat az energia nagy távolságokra történő szállítására, míg a földgáztárolók a szezonális tárolására alkalmasak, támogatja a villamos energia elosztóhálózatok rugalmas működését, valamint hozzájárul az energiaellátás biztosításához.

Az E.ON által végzett elemzések alapján az épületek energetikai felújításai olyan ütemben haladnak, hogy 2050-re nagy részük még nem lesz alkalmas alacsony hőmérsékletű hőszivattyús fűtés alkalmazására. Az ipar – a magas fűtési energia és alapanyagigénye miatt – továbbra is egy nehezen elektrifikálható terület.

A földgázhálózati infrastruktúra adott és jól kiforrott, biztonságos üzemeltetésével teszi lehetővé, hogy még nagyon hosszú ideig támaszkodhassunk rá.

A földgázhálózatok zöldítése érdekében az E.ON nemzetközi szinten is számos területen végez kísérleteket egyetemekkel, kutatóintézetekkel, valamint más cégekkel, melyek alapján a németországi E.ON gázstratégiája három alternatíváját látja a földgáznak. Ezek a hidrogén, a szintetikus metán és a biometán.

Peter Altmaier Németország gazdasági minisztere szerint: „A zöld hidrogén kulcsfontosságú energiaforrás a jövőben, és szükségünk van rá a klíma-semlegesség felé vezető úton...”

Mi szükséges egy hatékony energiaátmenethez?

Várhatóan a vízből és a megújuló villamos energiából előállított zöld hidrogén 2030-tól felülmúlja a hagyományos hidrogént – állítja Kadri Simson az Európai Bizottság energiapolitikáért felelős biztosa. Ennek a folyamatnak az elindításához a német kormány felhívásokat indított a projektek uniós költségvetésből történő finanszírozására a Horizont 2020 kutatási program és az Innovációs Alap keretében. Németországban további támogatási mechanizmusokkal élénkítik a zöld hidrogén előállítását célzó beruházásokat a nehéz- és vegyiparban. A Németországban hatályos Megújuló Energiákról szóló törvény (EEG) módosításával a zöld hidrogén előállítására felhasznált villamos energia a törvény hatálya alól mentesítésre került, ezáltal nem kell megfizetni az előállítónak a pótdíjat. Támogatják a nagy hatékonyságú hidrogen-ready CHP erőművek létesítését.

Az E.ON a hidrogén értéklánc mentén kutatásokat végez és számos eredménnyel rendelkezik.

Hálózati infrastruktúra

A meglévő földgáz-infrastruktúra óriási tárolási potenciálja alapvető szerepet játszik majd a karbonsemleges jövőben. A költséghatékonyság érdekében Németországban az E.ON csoport vizsgálja a meglévő hálózati eszközök használhatóságát és hidrogén kompatibilitását.

A földgáz-infrastruktúra közvetlen dekarbonizációjához háromféle alternatíva kínálkozik, melyek a megvalósíthatóság szempontjából az alábbiak szerint rangsorolhatók:

- Szintetikus metán: metanizáció során a hidrogénből és széndioxidból előállított szintetikus metán az MSZ EN 1648 szabványban előírt földgázminőség beállítása után már Magyarországon is minden további nélkül betáplálható a földgázhálózatba.
- Hidrogénnel dúsított földgáz: Németországban a Német Gáz- és Vízügyi Szövetség (DVGW) szabályozása alapján 10 % (V/V) hidrogén bekeverés már most is lehetséges a földgázhálózatba a gázfogyasztó készülékek átalakítása nélkül, bizonyos esetekben a 20 % (V/V) is megvalósítható, bár ezt eseti alapon szükséges megvizsgálni.
- Tiszta hidrogén hálózat: a hálózat és a berendezések átalakítási programja szükséges, beleértve a kapcsolódó szabványokat és eljárásokat.

Szabályozási környezet és piac

A Magyar Nemzeti Energiastratégiában megfogalmazott célok és az Európai Unió által 2050-re kitűzött klímasemlegesség teljesítéséhez a jelenlegi előírások és jogszabályok illesztése, harmonizálása válik szükségessé. Ehhez K+F+I projektek megvalósításával a szabályozási és műszaki-biztonsági kérdések jó kiindulási alapot biztosíthatnak a jogalkotó számára.

Az E.ON csoport elemzése alapján az energiaátmenet biztosítása több lépcsőben valósulhat meg, ahol első körben a kék, majd második körben a zöld hidrogén versenyképessé válik a szürkével szemben. Az átmenetet nagymértékben elősegíti a nemzetek közötti hidrogén piac kialakulása, a CCU és CCS technológiák fej-



lődése és alkalmazása. Az elektrolízátorok további fejlesztésével és a gyártási kapacitások fokozásával elérhető hidrogén előállítás költségei csökkenése, továbbá a szén-dioxid kvóták szigorítása is hozzájárul a zöld hidrogén mielőbbi implementálásához.

A megfelelő rendeletek, a harmonizált ipari szabályzatok és szabványok előfeltételei a hidrogén-technológiák kiforrott, kereskedelmi piacának. Tudományosan megalapozott technológiai szabályok és szabványok lehetővé teszik a hidrogén technológiák biztonságos bevezetését, valamint a gazdasági és ipari szereplők számára a stabilitást az Európai Unió tagállamai számára.

Oktatás, kutatás és Innováció

A power-to-gas technológiák speciális mérnöki tudást igényelnek, melyet a felsőoktatási intézményekben, szakképzési központokban és ipari szereplők által biztosított duális képzésekben lehet elsajátítani. A hidrogén értéklánc mentén jelentkező kérdésekre minta-

laboratóriumok kialakításával, kutatási tevékenység beindításával tudunk válaszokat adni – különösképpen földgázhálózati betáplálás vonatkozásában. Ezen tevékenységek nélkülözhetetlenek a biztonságos üzemeltetés érdekében. A földgázelosztásra és -felhasználásra vonatkozó szabványok és előírások módosításához elengedhetetlenül szükségesek a hidrogén-földgáz keverékek százalékos arányának függvényében jelentkező hatások kutatása és megismerése. A felhasználói oldalon jelentkező hatásokkal kapcsolatban, valamint a mérés és elszámolás korrekt megvalósításához további vizsgálatokra lesz szükség.

A fentiekben túl a hidrogén-földgáz keverékek különféle szagossági és szivárgásérzékelési technológiáinak hatékonyságának felmérése is megoldandó feladat.

A jövő dekarbonizált világa elsősorban a villamos energiára támaszkodik, valamint az energiahordozók közötti flexibilis konverzióra, amiben nagy szerepe lesz a power-to-gas technológiáknak.

E.ON Hungária Off-Grid Energiakonténer: Napelemmel (1) termelt villamosenergia-tárolása akkumulátorokban valamint elektrolízissel előállított hidrogénben (2), az eltárolt energia visszaalakítása tüzelőanyagcellával (3)



A fotovillamos termeléssel összekapcsolt power-to-gas technológia lehetőségei a Visegrádi országokban

Dr. Pintér Gábor¹, Hegedűsné Dr. Baranyai Nóra¹, Dr. Vincze András¹, Csányi Szilvia¹, Dr. Zsiborács Henrik¹

¹ Pannon Egyetem, Környezetgazdaság Egyetemi Központ, Nagykanizsa, Megújuló Energiaforrások Kutatócsoport
<https://theresresearch.wixsite.com/renewable-energy>
 e-mail: pinter.gabor@uni-pen.hu

Jelen tanulmány a visegrádi négyek menetrendezésre kötelezett fotovillamos (PV) erőműveit vizsgálja. Megállapítására került, hogy az egyes országok rendszerirányítói (TSO) által monitorozott PV kapacitások menetrendtartásával összefüggésben a helyi TSO-nak mekkora szabályozási igénye keletkezik. A kutatás során ezek az igények éves szinten kerültek aggregálásra. A szerzők továbbá meghatározták a „maradék szabályozási igényt”, lítium-ion energiatároló alkalmazását feltételezve. A vizsgálat eredménye alapján elmondható, hogy a monitorozott PV kapacitásokat tekintve, egyedül Magyarországon keletkezik maradék negatív szabályozási igény, ami azt vetíti elénk, hogy a négy visegrádi ország közül egyedül Magyarországon javasolt a PV erőművek szabályozása során maradék többletenergia hasznosítására az elektrokémiai energiatároló mellett power-to-gas technológia használata.

*

This study examines the photovoltaic (PV) power plants obligated to provide and follow schedules in the four countries of the Visegrad Group. It was established how much regulation need occurred on the part of the local transmission system operators (TSO) in connection with keeping the schedules of the PV capacities monitored by the TSOs. In the course of the research, these needs were aggregated for every examined year. Furthermore, the 'remaining regulation requirement' was also determined, assuming the use of lithium-ion energy storage systems. Based on the results of the investigations, it can be stated that regarding the monitored PV capacities, it was only Hungary where a remaining requirement for negative regulation occurred. This suggests that, among the nations of the Visegrad Four, Hungary is the only one where, besides electrochemical energy storage, the use of power-to-gas technology is worthy of recommendation for the utilization of the extra energy that remains as a result of the regulation of the PV power plants.

Szakirodalmi áttekintés

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése az Európai Unió tagállamainak közös célkitűzése. Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások, mint a szél és a napenergia napjainkban egyre nagyobb szerepet töltenek be a világ energiaellátási szükségleteinek kielégítésében. A nap- és a szélenergia nagymértékű hasznosítási tervei kapcsán szükséges megemlíteni, hogy a villamosenergia-rendszer megfelelő mértékű flexibilitása elengedhetetlen az időjárásfüggő energiatermelésben, illetve a piaci kínálat változásaihoz való alkalmazkodásban. A napelemes rendszerek energiatermelésének szabályozásával kapcsolatban egyre inkább előkerülnek az akkumulátoros megoldások, hiszen napjainkban már egyszerű

ezek beszerzése, és néhány hónapon belül beüzemelhetők. Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások hatékony alkalmazása érdekében szükség van tartalékolt energiára a rendszer egyensúlyának biztosításához. A tartalék energiát energiatárolók biztosítják, mint a rugalmas rendszerek kulcsfontosságú elemei, melyeknek fontos szerepe van mind a rendszerek szabályozásában, mind a hálózatok jobb működésében, mind pedig a végfogyasztók energiavásárlásának segítségével. Az energiatárolók a rendszerek különböző pontjaiba építve különböző funkciókat tölthetnek be, tehát más-más célokra alkalmazhatóak.

A villamosenergia-tárolók legfontosabb alkalmazási területei [1]:

- az időjárásfüggő megújuló energiaforrások termelésének kisimítása „firming”;
- a megtermelt villamos energia időbeli eltolása „shifting”;
- a frekvenciaszabályozás;
- a feszültségszabályozás;
- a rendelkezésre állási kapacitás.

Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások terjedésével párhuzamosan egyre nagyobb globális igény mutatkozik az energiatárolásra [2–6]. 2030-ra globálisan 6,6 – 15,7 TWh lesz a beépített energiatárolási kapacitás, ami 2017-ben még csak 4,67 TWh volt. Az előrejelzések alapján az Európai Unió becsült névleges energiatárolási teljesítménye akár 95 GW-ra, míg az energiatárolási képessége legfeljebb 4,1 TWh-ra növekedhet 2040-ig [2,7–9].

Világviszonylatban jelenleg az elektrokémiai, akkumulátoros energiatárolók a jellemzőek a szivattyús-tározós (PHS) rendszerek mellett. Ennek oka a többi technológiához viszonyított magasabb hatásfokukban és alacsonyabb költségükben keresendő. További előnyük, hogy könnyen és gyorsan (néhány hét/hónap alatt) telepíthetők [10], és a hálózati igényekre szinte azonnali reakcióidővel képesek válaszolni [11]. Ennek ellenére érdekes tény, hogy bár a power-to-gas technológia hatásfoka 30-40%-kal alacsonyabb a Li-ion akkumulátor hatásfokánál, egy hétnél hosszabb tárolási időintervallum esetén mégis alkalmasabb megoldás az energiatárolási feladatok ellátására, mint az elektrokémiai változat [12,13].

Az energiatárolás jogi szabályozása jelenleg nem egységes az Európai Unióban, azonban mivel ez egy dinamikusan változó innovatív terület, valószínűsíthető a jogi szabályozási környezet megváltozása [2,14].

Power-to-Gas

A power-to-gas egy olyan, szezonális energiatárolásra is alkalmas energiaátalakító eljárás, mely villamos energia felhasználásával metánt állít elő. Jelen kutatásban a folyamat villamos energia igénye került a fókuszba.

A többlépcsős power-to-gas eljárás során a power-to-hydrogen szakaszt a power-to-methane követi, ami az első szakaszban képződött hidrogént hasznosítja metanizáció segítségével. A metanizáció napjaink egyik sokat kutatott témája, ugyanis a légkör széndioxid tartalmának csökkenését eredményezhetné, ha az eljárás elterjedésének hatására a metanizációhoz szükséges széndioxidra jelentős kereslet mutatkozna [15]. A metanizációs folyamat eredményeként létrejövő biometán korlátlan mennyiségben táplálható a földgázhálózatba, mivel tulajdonságai megegyeznek a földgázzal.

A power-to-gas folyamat két kulcseleme az elektrolízis és a metanizáció:

1.) A technológia során alkáli, PEM vagy szilárd-oxidos elektrolízist alkalmaznak, melyek közül az alkáli a legrégebb óta alkalmazott megoldás. Az időjárásfüggő megújuló energiák, mint például a napenergia esetében a PEM eljárás az előnyösebb, mivel rugalmasabb rendszert eredményez (például, mert gyorsabban indítható be a folyamat). Ezenkívül kb. 5%-kal magasabb működési hatékonyságra képes. [16][17] A szilárd-oxidos eljárás a PEM-hez képest még kisebb villamos energia igényű, viszont rendszerstabilitása alacsonyabb, míg hőigénye magasabb [17].

2.) A power-to-gas technológiához jellemzően biológiai és katalitikus metanizálást alkalmaznak. A katalitikus (vagy más néven kémiai, vagy Sabatier) folyamatot már az 1970-es évek óta alkalmazzák. A biológiai metanizáció azonban előnyösebb, mert mintegy 20%-kal magasabb szén-dioxid konverziós ráta érhető el vele, mint a katalitikus eljárással. [18] A biológiai eljárás ezenkívül rugalmasabb is (például gyorsabban beindítható), és alacsonyabb nyomás- és hőmérsékletigényű, mint a katalitikus eljárás. Az időjárásfüggő megújuló energiaforrásokhoz a magasabb fokú működési rugalmassága miatt a biológiai metanizálás javasolt [19] [20] [21].

Az iparági és tudományos szereplők véleménye is megegyezik abban, hogy a power-to-gas technológia jelentős jövőbeli potenciállal rendelkezik [18] [17]. Jelenleg azonban csak néhány ipari méretű power-to-gas üzem található világszerte, így a technológia még csak a felfutási fázisban tart [22].

Anyag és módszer

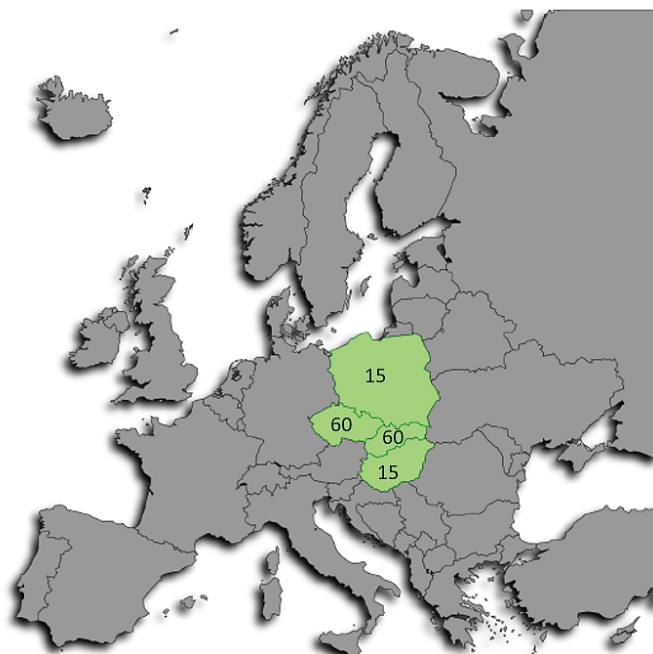
A számításokhoz a négy visegrádi ország tekintetében az European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) adatbázis adatait vettük figyelembe. ENTSO-E adatbázis 42 db átviteli rendszerirányító (TSO) adatait tartalmazza Európa 35 országából. (36 ország tagja a szövetségnek, azonban a megfigyelő tagról, Törökországról nem tartalmaz adatokat.) Az ENTSO-E az Európai Unió belső villamos-energia piacának megteremtése és jövőbeni liberalizációja miatt jött létre.

Az ENTSO rendszerhez csatlakozott országok kétféle menetrendet készítenek:

- napi („day ahead”);
- napon belüli menetrend („intraday” vagy „most recent”).

A termelőknek a napi menetrendet a termelést megelőző nap legkésőbb 12:00-ig kell leadniuk az időjárás előrejelzési adatok függvényében. A napon belüli menetrend a napi menetrend egy javítási lehetősége (tehát leadása nem kötelező), melyben naponta többször is lehetőség nyílik korrekcióra, és melynek az aktiválásához általában 2 óra átfutási időre van szükség [23,25].

A számítások során a menetrendeknél 0%-os tolerancia szintet alkalmaztunk, vagyis pontosan határoztuk meg a napon be-



1. ábra. Az ENTSO-E szövetség vizsgált országai: a visegrádi négyek. 15-ös számmal jelölve azon országok, ahol 15-perc alapú a PV menetrendezési kötelezettség, míg 60-as számmal azok jelölve, ahol 60-perc alapú PV menetrendezési kötelezettség áll fenn. Forrás: [24] alapján saját szerkesztés

lül menetrend és a ténytermelés különbségét, ami megfelel a „Transmission Congestion Relief” [26] megközelítésnek.

Az elemzésekhez az ENTSO-E adatbázis 15-perc alapú (Magyarország és Lengyelország) vagy 60-perc alapú (Szlovákia és Csehország) PV erőmű termelési adatait (mért tényleges termelés, napi előrejelzés, napon belüli előrejelzés) használtuk (1. táblázat) [24,27,28]. Érdemes megemlíteni, hogy a hosszabb időintervallum (60-perc) több szabadságot biztosít az egyes piaci szereplőknek menetrendjük összeállításában és menedzselésében, mint a 15-perces, hiszen utóbbi sokkal pontosabb meteorológiai előrejelzés alapján tervezhető csak. Számításaink során végig külön kezeltük a 15- és a 60-perces adatokkal rendelkező országokat.

1. táblázat. Napon belüli menetrend adatok jellemzői a vizsgált országokban [24,27,28]

Ország	Hozzáférhető PV előrejelzés (menetrend)	Előrejelzés intervalluma (perc)	Vizsgált időintervallum	Adatszolgáltató
Csehország	Napi és napon belüli előrejelzési adatok is elérhetőek	60	2019.09.01–2020.08.31	ENTSO-E
Magyarország		15		ENTSO-E
Lengyelország		15		ENTSO-E
Szlovákia		60		ENTSO-E

Forrás: [24,27,28] alapján saját szerkesztés

Ahogy azt a 2. táblázat is szemlélteti az egyes országok tekintetében más-más méretű PV rendszerek adataival dolgoztunk. Ezért szükségünk volt a homogenizálásra, vagyis vizsgálataink során az összehasonlíthatóság kedvéért egységnyi PV rendszer szabályozási igényét határoztuk meg. A visegrádi négyek tekintetében 100 MWp PV rendszerre végeztük el az összehasonlítást.

2. táblázat. Az egyes országokban megvizsgált PV rendszerek teljesítményei

Ország	A vizsgált PV rendszerek teljesítménye (MWp)	
	2019.09.01.	2020.08.31.
Csehország	2 054	2 061
Magyarország	1 013	1 129
Lengyelország	nincs adat	1 928
Szlovákia	409	450

Forrás: [30] alapján saját szerkesztés

A négy visegrádi ország tekintetében csak napon belüli előrejelzési adatokkal számoltunk, feltételeztük, hogy ezek pontosabbak a napi menetrendnél.

Mivel Lengyelország esetében 2020 májusig nem álltak rendelkezésre adatok az ENTSO-E adatbázisában (2. táblázat), emiatt a rendelkezésre álló négy hónap tényleges termelési adataiból és az előrejelzés értékeiből kiszámítottuk a napi átlagot, majd ezt követően ezt az értéket 365-el megszorozva meghatároztuk a becsült éves termelést.

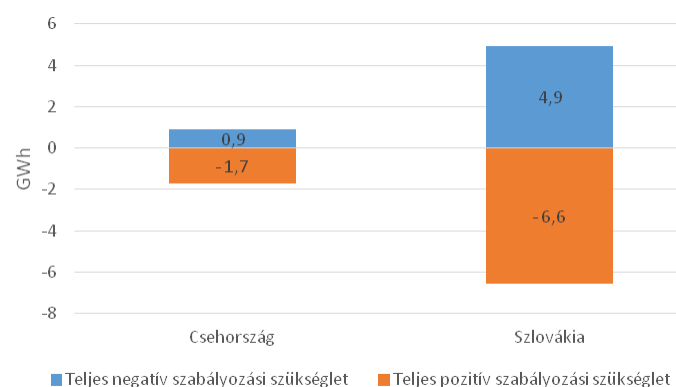
A modellezési logika a következőképpen épül fel:

- Ha a PV erőmű termelése nem éri el a menetrendben előrejelzett értéket, tehát alacsonyabb annál, akkor a TSO-nak felszabályozási szükséglete keletkezik a menetrendtartás miatt. Ezt a villamosenergia-rendszerbe táplált többlet villamos energiával tudja biztosítani.
- Ha a PV erőmű termelése meghaladja a menetrendben előrejelzett értéket, tehát magasabb annál, akkor a TSO-nak leszabályozási szükséglete keletkezik a menetrendtartás miatt. Ezt a villamosenergia-rendszerből elfogyasztott / értékesített villamos energiával tudja biztosítani.

Abban az esetben, ahol az előre jelzett termelési érték magasabb a tényleges termelésnél, ott a menetrendtartás érdekében felszabályozásra, míg ahol az előre jelzett érték alacsonyabb a ténylegesnél, ott leszabályozásra van szükség.

A visegrádi országok PV menetrendtartáshoz szükséges szabályozása

Először azon országok kerültek a vizsgálat középpontjába, ahol az ENTSO-E adatbázisban 60-perces PV menetrendi adatok álltak rendelkezésre (Csehország és Szlovákia). A 2. ábráról leolvasható,

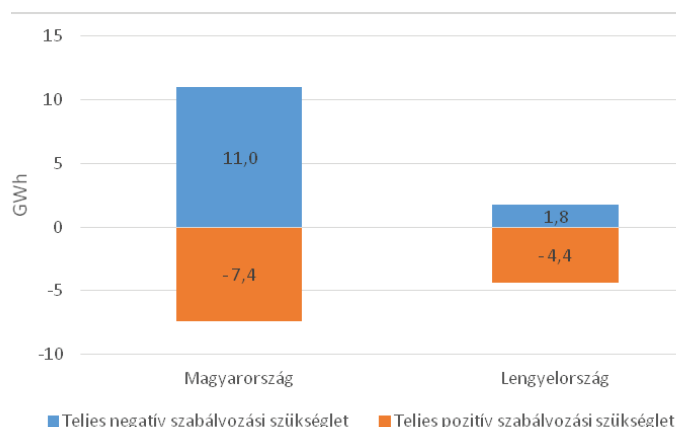


2. ábra. 100 MWp PV rendszer menetrendtartáshoz szükséges teljes szabályozási igény Csehországban és Szlovákiában 2019. 09. 01 – 2020. 08. 31. közti időintervallumban.

Forrás: [30] alapján saját szerkesztés

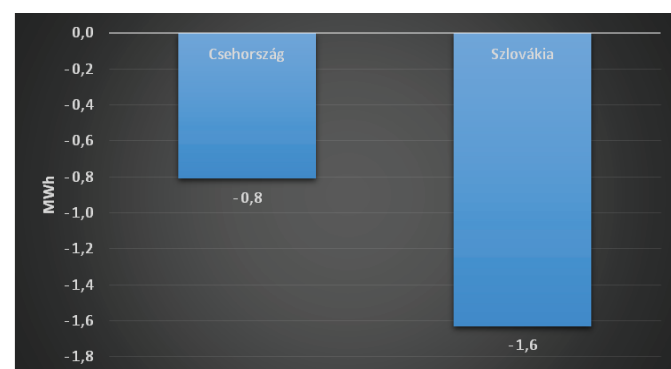
hogy Szlovákiának jelentősen nagyobb az egységnyi PV-re vetített szabályozási igénye Csehországnál. Szlovákia esetében a 100 MWp PV kapacitásra vetített igény +4,9 GWh és -6,6 GWh, míg ezek az értékek Csehországnál +0,9 GWh és -1,7 GWh (2. ábra). Megjegyzendő, hogy Szlovákiában Csehországhoz képest lényegesen kisebb a TSO által monitorozott PV kapacitás.

A 60-perces előrejelzést készítő országok után a 15-perces prognózisokat előállító országokat (Magyarországot és Lengyelországot) is megvizsgáltuk. Magyarország esetében 100 MWp PV kapacitás szabályozásához +11 GWh és -7,4 GWh-ra van szüksége a TSO-nak, míg Lengyelország tekintetében csak +1,8 GWh és -4,4 GWh-ra van szükség (3. ábra). Megállapítható, hogy Magyarországnak lényegesen nagyobb szabályozásra van szüksége 100 MWp PV kapacitáshoz. (Megjegyzendő, hogy Lengyelországban jóval nagyobb a TSO által monitorozott PV kapacitás.)



3. ábra. 100 MWp PV rendszer menetrendtartáshoz szükséges teljes szabályozási igény Magyarországon és Lengyelországban 2019. 09. 01 – 2020. 08. 31. közti időintervallumban. Forrás: [30] alapján saját szerkesztés

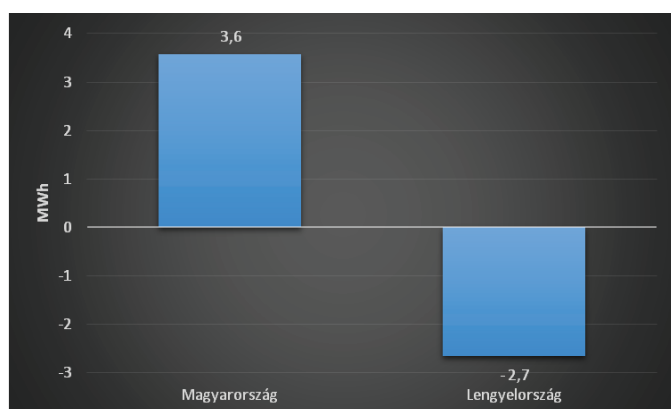
A 60-perces előrejelzést készítő országok szabályozási mérlegeit tekintve megállapítottuk, hogy a vizsgált időszakban monitorozott kapacitás alapján mind Csehország mind Szlovákia a PV menetrendtartáshoz felszabályozásra szorul, vagyis a menetrendtartáshoz többletenergia igénybevételére van szüksége a TSO-nak. Ezen felszabályozáshoz szükséges többletenergiát jellemzően gáz-erőművekből lehet fedezni, feltételezve azt, hogy a többi, abszolút értékben megegyező le- és felszabályozási igényt elektrokémiai tá-



4. ábra. 100 MWp PV rendszer menetrendtartáshoz szükséges „maradék” szabályozási szükséglet Csehországban és Szlovákiában 2019. 09. 01 – 2020. 08. 31. közti időintervallumban. Forrás: [30] alapján saját szerkesztés

roló segítségével tudja kielégíteni a két ország (a tárolási veszteségeket figyelmen kívül hagyva). Csehország tekintetében 100 MWp PV kapacitás összességében 0,8 MWh maradék felszabályozási igényt, míg Szlovákia esetében 1,6 MWh maradék felszabályozást jelent (4. ábra), ahol a maradék szabályozási igényt a pozitív és a negatív szabályozási szükségletek különbsége adja.

A 15-perces előrejelzést készítő országokat, vagyis Magyarországot és Lengyelországot vizsgálva, a „maradék” szabályozási szükségletet tekintve megállapítottuk, hogy Magyarországnak leszabályozásra, míg Lengyelországnak felszabályozásra van szüksége. 100 MWp PV kapacitásra vetítve Magyarországnak 3,6 GWh „maradék” leszabályozás, míg Lengyelországnak 2,7 GWh „maradék” felszabályozási igénye volt (5. ábra). Ebből az következik, hogy a monitorozott Lengyelországi PV kapacitásoknál a menetrendtartáshoz elektrokémiai tárolón kívül (ami a betárolt energiát kisebb veszteségek után szükség esetén ki tudja táplálni a hálózatra) még gázerőművekre, míg Magyarországon leszabályozásra képes időszakos fogyasztóra, mint például egy power-to-gas erőműre van szükség.



5. ábra. 100 MWp PV rendszer menetrendtartásához szükséges „maradék” szabályozási szükséglet Magyarországon és Lengyelországban 2019. 09. 01 – 2020. 08. 31. közti időintervallumban. Forrás: [30] alapján saját szerkesztés

Abban az esetben, ha egy ország pozitív szabályozási szüksége megegyezik a negatív szabályozási szükségletével, úgy elektrokémiai energiátároló alkalmazásával is meg tudja oldani a szabályozást. Ha az energiát 6 órán belül szeretné felhasználni, akkor Li-ion akkumulátor alkalmazása javasolt, míg, ha 6-12 óra távlatában, akkor NaS vagy folyadékkakkumulátorok oldhatják meg a problémát.

Megállapítottuk, hogy a vizsgált négy országok közül egyedül Magyarország tekintetében jelentkezik maradék negatív szabályozási igény, vagyis a monitorozott PV rendszereket tekintve Magyarországnak marad terven felüli többletenergiája. Ezt a többletenergiát is célszerű felhasználni, értékesíteni, amire a power-to-gas technológia kínál jó megoldást, mely a felesleges villamos energiából gázt állít elő. Magyarország jól kiépített földgázhálózattal rendelkezik, így az előállított gáz szállítása is könnyen megoldható.

A MAVIR-nak a 2019. szeptember 1. és 2020. augusztus 31. között kezelt PV erőművek menetrendtartásából adódó kiszabályozási szüksége miatt 3,6 GWh energia „maradék” leszabályozási szüksége keletkezik 100 MWp PV kapacitás szabályozása során, amennyiben a le- és felszabályozást elektrokémiai technológia oldja meg. A 3,6 GWh leszabályozási energia szükséglet felfoga-

3. táblázat. Az power-to-gas eljárás során előállított gáz jellemzői

Jellemzők	Mértékegység	Érték
Monitorozott PV kapacitás Magyarországon	MWp	1 129
Maradék leszabályozási energia	MWh / 100 MWp	3 600
Teljes maradék leszabályozási energia szükséglet 1129 MWp PV rendszerhez	MWh	40 644
Megtermelt metán	MJ	79 256
	Nm ³	2 085 679

Forrás: Saját szerkesztés [30] alapján

tó „maradék többlet villamos energiaként” is, amiből power-to-gas technológiát alkalmazva gáz állítható elő. A Magyarországon előállítható gáz mennyiségét a 3. táblázat szemlélteti (PEM elektrolízis és biológiai metanizáció esetén, a Power to Gas Hungary Ltd. technológiájának használatát feltételezve).

Ahogy az a 3. táblázatból kitűnik, 2 085 679 normál m³ szintetikus metánt lehetséges 40,6 GWh többlet villamos energiával előállítani Magyarországon. Hazánkban jelenleg csupán egy power-to-gas létesítmény található, amely 0,1 MW villamos energia felhasználásával 97,5 GJ szintetikus metánt tud előállítani biológiai metanizációval és PEM elektrolízissel. A számításokhoz szükséges adatok tőlük származnak.

A gázmérővel rendelkező, 20 m³/h fogyasztást nem meghaladó lakossági fogyasztóra vonatkozó kereskedelmi egységgel számolva, 350 HUF/EUR árfolyamot feltételezve: nettó 0,34 EUR/Nm³ gázzal számolva az elektrokémiai tárolással már optimalizált nap-erőmű menetrendben a P2G technológia segítségével 709 131 euró értékben lehetne földgázt kiváltani, annak érdekében, hogy a menetrendtartás még pontosabb legyen.

Következtetések

A szerzők a négy visegrádi ország ENTSO-E adatbázisban szereplő, a területileg illetékes TSO-k által monitorozott PV tény termelését és a hozzá kapcsolódó intraday előrejelzéseit vizsgálták. Csehország és Szlovákia esetében 60-perces előrejelzések, míg Magyarország és Lengyelország esetében 15-perces előrejelzési adatok álltak rendelkezésre. Az összehasonlíthatóság kedvéért a szabályozási igényt 100 MWp kapacitású PV rendszerre vetítettük. Az egyes országok TSO-inak monitorozott PV kapacitásait megvizsgálva azt az eredményt kaptuk, hogy az azonos abszolút értékű fel- és leszabályozáson felül (amit elektrokémiai energiátárolóval célszerű kiszabályozni) egyedül Magyarország esetében van szükség maradék leszabályozásra a PV-khez. A másik három ország (Lengyelország, Szlovákia és Csehország) esetén a monitorozott PV kapacitások menetrendtartásához maradék felszabályozás szükséges, melyet elsősorban gázerőművek segítségével érhetünk el. A fentiekből következik, hogy Magyarországon a menetrendtartáshoz a maradék szabályozás során egy rugalmas fogyasztó bekapcsolása szükséges, mely a szerzők véleménye szerint optimális esetben egy power-to-gas erőmű is lehet. Ezen erőmű közel 2,1 millió Nm³ szintetikus metán megtermelésére is alkalmas a „felesleges” villamos energia felhasználásával.

A vizsgálat egyértelműen rámutatott, hogy a visegrádi négyek közül Magyarországon érdemes és szükségszerű a rendelkezésre álló PV kapacitások power-to-gas erőművekkel való összekötése.

Az eredmények nem jelentik azt, hogy a másik három országban (Lengyelország, Csehország és Szlovákia) nem lehet power-to-gas üzemeltetést létesíteni, pusztán azt mutatják, hogy az ENTSO-E rendszerben szereplő, a helyi TSO-k által monitorozott PV kapacitásokhoz Magyarországon nagyobb szükség mutatkozik a power-to-gas erőművekre, mint a többi országban.

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.

Irodalomjegyzék

- Sandia National Laboratories DOE Global Energy Storage Database.
- International Renewable Energy Agency Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030; Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017;
- Kondziella, H.; Bruckner, T. Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 53, 10–22, doi:10.1016/J.RSER.2015.07.199.
- Beaudin, M.; Zareipour, H.; Schellenberg, A.; Rosehart, W. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy Sustain. Dev.* 2010, 14, 302–314, doi:10.1016/J.ESD.2010.09.007.
- Deane, J.P.; Ó Gallachóir, B.P.; McKeogh, E.J. Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010, 14, 1293–1302, doi:10.1016/J.RSER.2009.11.015.
- Chen, H.; Cong, T.N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; Ding, Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Prog. Nat. Sci.* 2009, 19, 291–312, doi:10.1016/J.PNSC.2008.07.014.
- Zsiborács, H.; Baranyai, N.H.; Vincze, A.; Zentkó, L.; Birkner, Z.; Máté, K.; Pintér, G. Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040. *Electronics* 2019, 8, 729, doi:10.3390/electronics8070729.
- Sandia National Laboratories. DOE Global Energy Storage Database, Office of Electricity Delivery & Energy Reliability.
- Gimeno-Gutiérrez, M.; Lacal-Arántegui, R. Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage based on two existing reservoirs. *Renew. Energy* 2015, 75, 856–868, doi:10.1016/J.RENENE.2014.10.068.
- engineering.com. After One Year of Operation, Tesla's Australian Mega Battery Is Doing Just Fine.
- Energen Power Holding AB. Energen, IntelliStoree; Budapest, Hungary, 2018;
- Steinke, F.; Wolfrum, P.; Hoffmann, C. Grid vs. storage in a 100% renewable Europe. *Renew. Energy* 2013, 50, 826–832, doi:10.1016/J.RENENE.2012.07.044.
- Fuchs, G.; Lunz, B.; Leuthold, M.; Sauer, D. Technology Overview on Electricity Storage - Overview on the potential and on the deployment perspectives of electricity storage technologies; Berlin, Germany, 2012;
- Cochran, J.; Bird, L.; Heeter, J.; Arent, D.J. Integrating Variable Renewable Energy in Electric Power Markets: Best Practices from International Experience; Oak Ridge and Springfield, United States of America, 2012;
- 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.
- 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.
- 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.
- Bailera, M.; Lisbona, P.; Romeo, L.M.; Espatolero, S. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 69, 292–312.
- Martin, M.R.; Fornero, J.J.; Stark, R.; Mets, L.; Angenent, L.T. A single-culture bioprocess of methanothermobacter thermotrophicus to upgrade digester biogas by CO₂-to-CH₄ conversion with H₂. *Archaea* 2013, 2013, doi:10.1155/2013/157529.
- Sinóros-Szabó, B.; Zavarkó, M.; Popp, F.; Grima, P.; Csédő, Z. Biomethane production monitoring and data analysis based on the practical operation experiences of an innovative power-to-gas benchscale prototype. *Acta Agrar. Debreceniensis* 2018, 399–410, doi:10.34101/actaagrar/150/1736.
- Simonis, B.; Newborough, M. Sizing and operating power-to-gas systems to absorb excess renewable electricity. *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, 42, 21635–21647, doi:10.1016/j.ijhydene.2017.07.121.
- Ghaib, K.; Ben-Fares, F.Z. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 433–446.
- Elia Group. Grid data - Generation.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) ENTSO-E Transparency Platform.
- Elia Group. Forecast and actual solar-PV1 power generation; Brussels, Belgium, 2019;
- Garrett, F.; James, M.; Jesse, M.; Hervé, T. THE ECONOMICS OF BATTERY ENERGY STORAGE - HOW MULTI-USE, CUSTOMER-SITED BATTERIES DELIVER THE MOST SERVICES AND VALUE TO CUSTOMERS AND THE GRID; Colorado, United States, 2015;
- Elia Group Solar-PV power generation data.
- Hungarian Transmission System Operator - MAVIR ZRt. PV power generation, estimation and fact data.
- Zsiborács, H.; Hegedűsné Baranyai, N.; Zentkó, L.; Mórocz, A.; Pócs, I.; Máté, K.; Pintér, G. Electricity Market Challenges of Photovoltaic and Energy Storage Technologies in the European Union: Regulatory Challenges and Responses. *Appl. Sci.* 2020, 10, 1472, doi:10.3390/app10041472.
- Pintér, G. The potential role of power-to-gas technology connected to photovoltaic power plants in the Visegrad countries – a case study. *MDPI ENERGIES* 2020, 1–15.
- Csedő, Z.; Sinóros-Szabó, B.; Zavarkó, M. Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology. *Energies* 2020, 13, 4973, doi:10.3390/en13184973.

A power-to-gas, hálózatos innovációmenedzsment és versenyképesség a magyar energiaszektorban

Zavarkó Máté

doktorandusz, Budapesti Corvinus Egyetem, Vezetés és Szervezés Tanszék;
üzletfejlesztési menedzser, Power-to-Gas Hungary Kft., zavarko@p2g.hu

Az innovatív power-to-gas (P2G) technológiák várhatóan nagy hatással lesznek a jövő energiaszektorára, ugyanakkor a P2G innovációs folyamat menedzselésével kapcsolatban a versenyképességi szempontok eddig nem kerültek vizsgálatra. Jelen kutatás eredményei alapján a P2G innovációs ökoszisztéma szerepe kulcsfontosságú az innovációban részt vevő szervezetek és az energiaszektor versenyképességének összekapcsolásában és fejlesztésében. Az ökoszisztémában megvalósuló P2G innováció az energiatárolás és rugalmassági szolgáltatások, a dekarbonizáció, a karbonsemleges energiatermelés és társadalmi-lakossági értékteremtés területén is hozzájárulhat a magyar energiaszektor versenyképességének növeléséhez.

*

The innovative power-to-gas (P2G) technologies are expected to have a great impact on the future energy sector. The management of the P2G innovation process, however, has not been analyzed yet from the aspects of competitiveness. Based on the results of this study, a P2G innovation ecosystem could have a crucial role to connect and increase the competitiveness of the participating organizations and the competitiveness of the energy sector. The P2G innovation that is realized in the ecosystem could contribute to the competitiveness of the Hungarian energy sector in four areas: energy storage and flexibility services, decarbonization, carbon-neutral energy production, and social-residential value creation.

Az energiaszektor globális változásával kapcsolatban a fenntarthatóság [1], a megújuló energiák [2], a decentralizáció [3], az okos eszközök [4], az energiahatékonyság és -biztonság [5] mellett egyre gyakrabban előtérbe kerül az a hálózati integrációs kihívás és az energiatárolási feladat, amelyet a volatilis megújuló energiatermelés indukál [6]. Összhangban az EU klímasemlegességi stratégiájával, Magyarországon a – számos környezeti probléma kezelésében ígéretes – fotovoltaiikus kapacitások tervezett növekedésével kapcsolatban releváns a többlet megújuló energiatermelés eltárolása [7, 8, 9]. Kedvező tényező, hogy a power-to-gas (P2G) technológiák szezonális, nagy volumenű, a meglévő földgázrendszer kapacitását hasznosítani tudó energiatárolási képessége és hálózat-kiegészítési, rugalmassági funkciója [10] ma már nemcsak az elmélet és a laboratóriumi szintű fejlesztések szintjén releváns téma, hanem az ipari méretű P2G üzemlétesítés már a közeljövő feladata lehet [11]. Magyarországon a Power-to-Gas Hungary Kft. egy olyan innovatív P2G technológia fejlesztésével foglalkozik, amelyben az elektrolízis útján megtermelt hidrogén és az általában biogén forrásból származó szén-dioxid reakcióját egy szabadalmaztatott mikroorganizmus katalizálja. Ez a megoldás lehetővé teszi többlet villamos energia biometánná történő átalakítását, ezzel a megújulóknak nagyobb mértékű integrációját, a szén-dioxid újrahasznosítását és

a villamosenergia-hálózat stabilizálását is a csúcsidőszaki energia-termelés során [12, 13].

Míg a power-to-gas témájú szakirodalom műszaki és gazdasági fókuszú kutatásokban már-már bővelkedik [14], addig „a power-to-gas mint innováció” vagy „a power-to-gas mint innovációmenedzsment feladat” szemlélet egy-két kivétellel [15, 11] nem nagyon került előtérbe. Ugyanakkor, ez a gyakorlatban igen meghatározó szempont: a power-to-gas újdonságértéke és hatása a jövő energiaszektorára igen jelentősnek mondható, de széles körben még nem került alkalmazásra [16, 17]. Jelen kutatás ezen a területen szeretne hozzájárulni a P2G terjedéséhez, rávilágítva egyúttal az eddig szintén figyelmen kívül hagyott, ugyanakkor a regionális, nemzetgazdasági, iparági és vállalati szempontból is fontos, továbbá az innovációval is összefüggő versenyképességi szempontokra [18]. Következésképp a kutatás *P2G-hez kapcsolódó innovációmenedzsment* potenciális *versenyképességi* vetületeire fókuszál a magyar energiaszektorban.

Ez a megközelítés mindeztől kezdve a nemzetközi szakirodalomban sem került elő. A versenyképesség és a P2G kapcsolatát Brunner és társai [19] vizsgálják, de más fókusszal, céljuk a különböző P2G működési koncepciók versenyképességének összehasonlítása volt; illetve általában a kutatások a P2G versenyképességére fókuszálnak (például más energiatárolási technológiákkal összehasonlítva) [20, 21], és nem a P2G általi versenyképesség-növelés lehetőségeivel foglalkoznak. Jelen téma relevanciája azonban – mint a versenyképességi kutatásoknak általában – gyakorlati igényből és a lokális (nemzeti) kontextusból is fakad. Fagerberg [22] például rámutat, hogy a versenyképesség mint fogalom sem elméleti kutatóktól, hanem a döntéshozók közelében dolgozó gyakorlati szakemberektől származik. Jelen kutatás relevanciája is hasonló eredetű: A megújuló energiák egyre nagyobb léptékű elterjedését, a karbonsemleges energiaszektor, ebben az energiatárolási technológiák fontosságát és a power-to-gas technológia potenciálját nemcsak a szakirodalom, de a Nemzeti Energiastratégia 2030 is rögzíti, mely több helyen említi a szektorális és a nemzetgazdasági versenyképesség javításának célját is [23]. A power-to-gas technológia hazai, iparági szintű implementációjának – remélhetőleg – küszöbén állva, érdemes megvizsgálni, hogy a P2G fejlesztésben érintett szervezetek hogyan járulhatnak hozzá saját versenyképességük és az energetikai versenyképesség növeléséhez. A kutatási kérdések a következők:

- 1) Milyen területeken lehetséges a magyar energetikai versenyképesség támogatása a P2G technológia fejlesztésével?
- 2) Milyen területeken fejleszthető a szervezeti szintű versenyképesség a P2G-hez kapcsolódó innovációmenedzsment során?

A következőkben a téma elméleti keretrendszere kerül bemutatásra először, ezt követi a módszertan ismertetése, majd az eredmények, végül a konklúziók lesznek olvashatók.

Elméleti keretrendszer

Az energetikai átalakulás iparági és vállalati aspektusai

A globális átalakulásnak való megfelelést az energiaszektor speciális történeti helyzetéből fakadó sajátosságok nehezítik. Például az energiaszektor a legtöbb fejlett országban részletes és szigorú szabályozás, merev intézményi keretrendszer jellemzi, s a külső környezet a szervezeten belül is a nyitottságot, együttműködést, innovációt kevésbé támogató kontextust eredményez [24]. A külső szigorú szabályozás mellett belső rugalmatlanság is jellemzi az energetikai nagyvállalatokat. Costa-Campi és társai [5] megállapították, hogy a vállalat nagy mérete a kutatás-fejlesztés hátráltató tényezője lehet, elsősorban a beruházási döntés hosszadalmassága miatt; ráadásul ez a jelenség az energiaszektorban még jellemzőbb, hiszen gyakoriak a kiterjedt tevékenységi körrel és szervezetel rendelkező hagyományos energetikai nagyvállalatok.

Tekintve, hogy az innováció és a változás szorosan összefügg [25, 26], a fenti kihívások miatt energetikai területen (is) érdemes együtt kezelni a két fogalmat. Az innováció és a változás összefüggéseinek értelmezése az erőforrásalapú stratégiai iskolára épülhet [27, 28, 29]. Eszerint a szervezeti teljesítményt az alapvető képességek határozzák meg elsősorban [30], és a szervezet képességeinek dinamikus újrakonfigurálása és az ebből fakadó stratégiai akciók és innovációk visszahatnak a külső környezetre, formálják a versenyt. Mivel a megújulási kihívásokra sokszor a külső partnerkapcsolatok jelentenek megoldást [31], az eddigieket érdemes kiegészítenünk a szervezetközi innovációs hálózatok koncepciójával [32]. Eszerint a szervezeti képességek kombinálhatók együttműködő szervezetek képességeivel is, és ennek eredményeként olyan, akár diszruptív innovációk [33] jöhetnek létre, melyek egy teljes iparágban (például az energiaszektorban) változást idézhetnek elő. Másképp fogalmazva, a külső környezet változása miatt szükségessé vált szervezeti változás [34] során nemcsak a szervezet lényeges jellemzőit (például technológiát vagy folyamatokat) [35, 36] módosíthatja az együttműködés más szervezetekkel, hanem a külső környezetben is további változást okozhat.

Innováció és versenyképesség

Ez az együttműködés versenyképességi kontextusban azt jelenti, hogy az együttműködő szervezetek közös teljesítménye olyan innovációhoz vezethet, amely a teljes iparág versenyképességét javíthatja. Mivel a versenyképesség többféle nézőpontból definiált a szakirodalomban [37, 38], érdemes a fentiekhez illeszkedően erőforrás-alapú és innovációs nézőpontból meghatározni a versenyképességet. A versenyképesség nemzetgazdasági vagy szektorális szinten értelmezve olyan – innováció által (is) létrehozott – képességek birtoklását jelenti, amelyek szükségesek a tartós gazdasági növekedéshez egy (nemzetközi) versenykörnyezetben [39]. Vállalati szinten értelmezve a tartós gazdasági növekedés mellett a változásokra történő reagálás [40], a fogyasztók igényeinek kielégítése, illetve az aktuális és releváns piaci információkhoz történő folyamatos kapcsolódás is a versenyképesség része [41].

Figyelembe véve, hogy az innováció (mint annak folyamata, amíg egy lehetőség a gyakorlatban is hasznos megoldással alakul [42]) egy olyan pozitív összegű játszma, melyben fontosak a már fentebb is említett komplementaritások [43], a szervezetközi innovációs hálózatok szintjén érdemes vizsgálni a P2G innováció versenyképességet támogató potenciálját.

Innovációs ökoszisztémák a versenyképesség érdekében

A hálózat heterogén szereplőit egy innovációs ökoszisztéma tartalmazza össze, amely egy olyan dinamikus és adaptív rendszer, amelynek résztvevői különböző szerepekkel, motivációkkal és képességekkel, de közösen járulnak hozzá egy innovációs folyamat sikeréhez [44]. Az innovációs ökoszisztéma motorjai a lehetőség megragadására képes új vállalkozások lehetnek, amelyek ráadásul a gazdasági fejlődéshez új munkahelyek teremtésével is hozzájárulhatnak [45]. Az innováció feltételeként a versenyképességi szakirodalom kiemeli (1) a vállalatok közötti, (2) az egyetemek és vállalatok közötti, de akár (3) az államigazgatási szervek és vállalatok közötti tudástranszfert is [39, 46]. Ebből az látható, hogy az innovációs ökoszisztémában nemcsak egy adott szektor vállalatai kaphatnak helyet, hanem kapcsolódó szektorok szervezetei is, ugyanakkor a versenyképességet meghatározza a kormányzati politika is [47].

Ennek megfelelően a szakirodalom az innovációs ökoszisztémák kormányzati támogatásával is foglalkozik. Például a klímaváltozáshoz hasonló nagy kihívásokra reagáló és ezekre erőforrásokat fókuszáló kormányzati beavatkozások révén az együttműködő hálózatok gyorsabban kialakulnak, és ezek akadémiai szektorokon és iparágokon is átívelhetnek [48]. A versenyképesség fejlesztését szem előtt tartó ilyen „erőforrás-fókuszálás” lehet olyan szabályozások bevezetése is, amelyek a tudományos és technológiai előrelépéseket bátorítják, vagy egy-egy iparágban belül a már létező új technológiák bevezetését, alkalmazását ösztönzik [49].

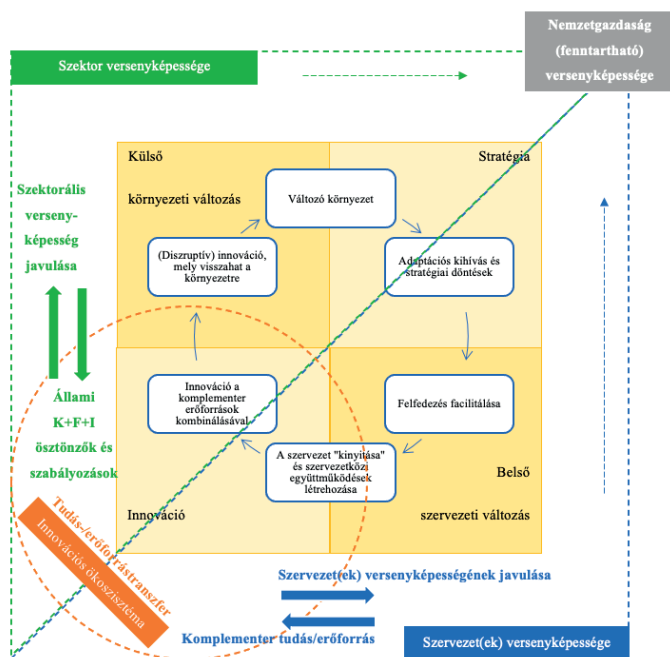
A gazdaság fenntartható versenyképessége

Az aktuális kihívásokat tekintve is különösen relevánsak az innovációs ökoszisztémák. Például a Világgazdasági Fórum szerint a COVID-19 járvány okozta visszaesés egyrészt ezen ökoszisztémák támogatásával fordítható vissza, ez a támogatás pedig a kockázati tőkebefektetés ösztönzését, a magánszektorban történő K+F támogatását, az új technológiák elterjesztését foglalhatja magába [50]. Mivel „bizonyos mértékig a versenyképesebb gazdaságok jobb pozícióban vannak az alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdasággá való átalakuláshoz” [51, p. x], energetikai szempontból így már nem (csak) fenntartott („sustained”) növekedésről kell beszélnünk, mint ahogy a kiinduló definícióban láthattuk, hanem fenntartható („sustainable”) növekedésről, amely igen jelentős tartalmi különbség. Ez a fenntartható növekedés (vagy fejlődés), amely egyensúlyt jelent a gazdasági, ökológiai és társadalmi szempontok között, szintén értelmezhető nemzetgazdasági kontextusban és vállalati kontextusban is [52], sőt a kutatások a felelős vállalatok és felelős vezetők közötti viszonyokkal is foglalkoznak [53]. Jelen elméleti keretrendszerben szervezetek közötti együttműködések kerülnek fókuszba, amelyhez az állami ösztönzés társulhat a „zöld” kutatás-fejlesztés és a műszaki akadályok leküzdése érdekében [51]. Fontos, hogy a legújabb empirikus kutatások arra is rávilágítottak, hogy a kedvező ökológiai, társadalmi és gazdasági környezet együtt képes támogatni a hosszú távú és fenntartható versenyképességet, azaz az előrelépés az egyik dimenzióban (például a klímavédelmi fejlesztésekkel) nem feltétlenül egy másik dimenzió (például a gazdasági növekedés) költségén történik [54].

Az elméleti keretrendszer összefoglalása

A fentieket összegezve, vállalati szempontból megállapítottuk, hogy az energetikai változásokhoz történő adaptációban a szervezetközi innovációs hálózatoknak kiemelt jelentőségük lehet, de a hálózatos

együttműködésből fakadó innováció pozitívan hathat az egész iparágra. Ugyanakkor, az energetikai versenyképesség növeléséhez szükség van e hálózaton belüli hatékony tudástranszferre egyetemek, vállalatok és államigazgatási intézmények között, melyet a kormányzati oldalról történő, fenntarthatósági K+F+I tevékenységek ösztönzése katalizálhat. Az 1. ábra arra is rámutat, hogy a vállalati versenyképességet és a szektorális versenyképességet az innovációs ökoszisztémák összekapcsolhatják és javíthatják is, ez pedig végül a nemzetgazdasági versenyképességre is hatással lehet (tekintve, hogy a versenyképes vállalatok által lesz versenyképes egy iparág és egy gazdaság is [48]).



1. ábra. Az innovációs ökoszisztéma szerepe a szervezeti és a szektorális versenyképesség összekapcsolásában (saját szerkesztés)

Módszertan

A kutatási kérdések megválaszolása kvalitatív módszertannal történt, ezen belül pedig az akciókutatás módszertana keretezi az adatgyűjtést és az adatelemzést. Mivel az akciókutatás összekapcsolja az elméletet és a gyakorlatot, illetve új tudást és változást generál komplex problémák megoldásához [55, 56, 57], ezért megfelelő választás a power-to-gas technológiával kapcsolatos implementációs kérdések megválaszolására és az energetikai szektorban történő megújulás elősegítésére. A kutatás környezete a Power-to-Gas Hungary Kft. és az az egyetemekből, vállalatokból, államigazgatási intézményekből álló szervezeti hálózat, amely Magyarországon a power-to-gas technológia fejlesztésében részt vesz vagy abban érintett.

Jelen kutatás egy 2016 óta tartó, a power-to-gas technológia fejlesztésének műszaki, gazdasági, továbbá üzletfejlesztési és menedzseri aspektusait is lefedő kutatássorozat része, és az eddigi stratégiai- és innovációmenedzsmenttel kapcsolatos eredmények versenyképességi fókuszú kiterjesztése. A következőkben olvasható eredmények dokumentumelemzésre és az eddig készített több mint 40 interjú grounded theory technika [58] szerinti kódolására és újrakódolására épülnek. Az újrakódolás a grounded theory ku-

tatási stratégia szerint nemcsak megengedett, de szükséges is, ugyanis az elmélet, az adatgyűjtés és az adatok elemzése között iterálnia kell a kutatónak, mely végül az empirikus adatokra épülő, szubsztantív, korlátozott társadalmi kontextusban érvényes elméletre vezet [59]. Jelen esetben az elméleti fókusz a versenyképességre került, melyet megelőzően először a szervezeti megújulás, majd a szervezeti innovációs hálózatok szerepe volt a gazdasági és menedzsment fókuszú power-to-gas kutatásaink fő elméleti kerete. Ezt a folyamatot ismertette felépítésével az Elméleti keretrendszer fejezet is.

Eredmények

A P2G szektorális versenyképességet támogató potenciálja

Az első kutatási kérdés a P2G fejlesztés versenyképesség-növelési területeinek azonosítását célozta. Mivel a Nemzeti Energiastratégia 2030 úgy fogalmaz, hogy a „stratégia megvalósítása hozzájárul hazánk versenyképességének javításához” [23, p. 13] és azonosítja a power-to-gas közvetlen potenciális értékteremtő szerepét az energiatárolásban, ezért e logika mentén a power-to-gas versenyképességet támogató tulajdonsága egyértelműnek látszik. A szezonális energiatárolás területén ezt egy 2020-as kutatásban empirikus adatokkal is alátámasztottunk szerzőtársaimmal [11]. Ugyanakkor, az 1. táblázat olyan további területeket is azonosít, amelyeken a P2G közvetetten is hozzá tud járulni a Nemzeti Energiastratégia 2030 által előírt stratégiai célokhoz és a stratégiában explicit megemlített, releváns versenyképességi célokhoz. E területek megállapításához a három demonstrációs P2G fejlesztést magába foglaló európai STORE&GO projekt [60] empirikus adatokra is épülő tanulmányainak, a Power-to-Gas Hungary Kft. technológiai vizsgálatainak és a Nemzeti Energiastratégia 2030 célkitűzéseinek elemzésére került sor.

A P2G szervezeti versenyképességet támogató potenciálja

A második kutatási kérdés a P2G technológiafejlesztésben rejlő szervezeti versenyképesség-növelési potenciál megvalósítására vonatkozott. (A vállalat helyett a szervezet kifejezést az akadémiai szereplők indokolják.) Az elméleti keretrendszer alapján innovációs ökoszisztémában kell gondolkodnunk, amely egy korábbi kutatásunk alapján empirikusan is bizonyított megközelítés [15]. Figyelembe véve a P2G alapvető energiatárolási funkcióját, és egy potenciális energiatárolási ökoszisztéma szereplőit is [67], a 2. táblázat a P2G innovációs ökoszisztéma szereplőit mutatja. A táblázatban – empirikus adataink alapján – a szereplőkhöz hozzárendelésre került az általuk biztosítható egyedi tudás vagy erőforrás, amellyel az innovációs ökoszisztéma teljesítményéhez hozzájárul(hat)nak. Végül, mivel a versenyképesség nemcsak szektorálisan, de szervezeti szinten is értelmezendő, a versenyképesség-fejlesztés egy-egy potenciális területe is listázásra került. Ezek meghatározásához az elméleti keretrendszerben rögzített, adaptációs képességet előtérbe helyező definíciót vettük figyelembe, miszerint a szervezeti versenyképesség négy pillére

- (1) a tartós gazdasági növekedés,
- (2) a változásokra történő reagálás,
- (3) a fogyasztók igényeinek kielégítése,
- (4) a folyamatos kapcsolódás az aktuális és releváns piaci információkhoz.

1. táblázat. A P2G potenciális versenyképesség-növelési területei európai és magyarországi kontextusban (saját szerkesztés)

P2G általi verseny-képesség-fejlesztés területei	Illusztratív megállapítások...	
	...európai kontextusban, a STORE&GO projekt eredményei alapján	...magyarországi kontextusban, kapcsolódás a Nemzeti Energiastratégia 2030 versenyképességi vetületeihez [23]
Karbonsemleges energiatermelés	A zöld metán elterjedése: 2030-ig az e tekintetben optimistának tekinthető forgatókönyvek szerint a 4%-os részesedés 12%-ra nőhet [61]. A P2M technológiával az importált gáz és az összes fogyasztott gáz aránya akár 30-40%-kal is csökkenhet 2050-ig. [62]	A karbonsemleges metántermeléssel csökkenthető a földgázimport, ami azért releváns, mert a földgázszükséglet kb. 80%-a importból fedezett (14.o.). A biogáz-, a biometán-, és a nem földgázalapú hidrogénfelhasználás ösztönzéséhez (12. o.) ezen energiahordozók megtermelése is hozzátartozik. A hidrogénből és a metánból bioüzemanyag vagy „zöld” üzemanyag gyártható, amely a közlekedés-zöldítési program (13. o.) része lehet.
Energiatárolás és rugalmassági szolgáltatások	A P2G bevezetése jótékony hatással van a hálózat üzemeltetésére. 7,2 GW _{el} P2G jelenléte jelentősen csökkenti a kiegyensúlyozatlanság tetőpontját (~ 45%) és időtartamát (> 95%) is. A P2G telepítésnek köszönhetően a fordított energiaáram 67%-kal, de akár 100%-kal is csökkenhet. [63]	Szezonális energiatárolás a földgázhálózat által, a power-to-gas technológiával előállított metán, a biogáz, és a hidrogén betáplálásával. (39. o.) E szezonális energiatárolással a hazai gáztárolás régiós versenyképessége (12. o.) is nőhet. A rugalmassági szolgáltatások hozzájárulhatnak a stratégiai vagy üzemzavari/hálózati tartalékrendszer megfelelőségéhez (12.o.)
Dekarbonizáció	A P2G rendszerek implementációjával a károsanyagkibocsátás csökkenthető, ezáltal a környezeti hatásai pozitívak. A legtöbb pozitívum a klímaváltozás terén mutatható ki [64]. A szintetikus metán kiemelkedő üvegházhatás-megtakarítást mutat abban az esetben, ha biogén szén-dioxid források lettek felhasználva a metanizáció folyamatában, illetve, ha a hidrogén megújuló energia általi elektrolízissel keletkezik [65].	2030-ra a hazai villamosenergia-termelés 90%-a mentes lesz a szén-dioxid-kibocsátástól (42. o.) Az ÜHG-intenzív ipari tevékenységek mellé történő telepítés és az ipari szén-dioxid felhasználása is ígéretes a metanizációs lépésben, így az ÜHG-intenzív ipari tevékenység versenyképessége növelhető (50. o.). A biogáz termelése, tisztítása a dekarbonizációs célok teljesítéséhez is hozzájárulhat (20. o.), amely különösen igaz, ha a szén-dioxid P2G technológiával metánná alakítható.
Társadalmi-lakossági értékteremtés	Egy esetlegesen felmerülő kínálati sokk az energiapiacra kevésbé hat a társadalmi jólétre, amennyiben a P2G technológia alkalmazásra kerül [64]. A napelem parkok és a P2G infrastruktúra fokozza az energiarendszer helyi energiaközösségek általi elfogadottságát [66].	A fotovoltai kapacitások növelése 2030-ig 6.000 MW-ra kiemelt cél (14. o.), melyet támogat a P2G technológia integrációs funkciója. A többlet villamos energia átalakítása metánná és eltárolása hatással lehet a kínálati oldalra, mely a megfizethető energiaellátás céljához kapcsolódik (10. o.).

2. táblázat. A P2G innovációs ökoszisztéma szervezeti szintű versenyképesség-növelési potenciálja (saját szerkesztés)

Szektor	Szereplő	Egyedi kontribúció	Példák a potenciális versenyképességi előrelépésre	Hogyan?
Energetikai szektor	P2G technológiafejlesztő vállalat	Innovatív alaptermék, projektmenedzsment kapacitások	(1) Gazdasági növekedést produkál	A technológia felskálázásával, az innovációs lehetőség kiaknázásával
	Nagy energetikai vállalat / Stratégiai befektető	Kiterjedt infrastrukturális erőforrások, átfogó szektor-specifikus tudástőke, pénzügyi erőforrások	(2) Reagál az energetikai változásokra	A P2G technológiához történő kapcsolódással, innovatív tudás becsatornázásával
	P2G üzemeltető, telephely (pl. szennyvíztisztító telep, mezőgazdasági biogáz üzem)	Operatív működési infrastruktúra és üzemeltetési erőforrások a (pilot) üzemeltetéshez	(2) Reagál az energetikai változásokra	A P2G technológia (pilot) alkalmazásával (hatékonyabban működik, szén-dioxidot hasznosít újra)
Támogató szektorok	Egyetem, kutatóközpont	K+F kapacitások, akadémiai tudás	(4) Kapcsolatba lép az új ipari technológiákkal (információ)	Az ipari adatokhoz történő hozzáféréssel és ezek tudományos elemzésével
	Pénzügyi befektető	Pénzügyi erőforrások	(4) Kapcsolatba lép az új ipari technológiákkal (innováció)	A technológiafejlesztő vállalatba való befektetéssel
	Kapcsolódó technológiák fejlesztői	Komplementer megoldások (pl. ICT)	(3) A fogyasztók igényeinek kielégítése	Eddig ismeretlen feladat megoldásával
	Speciális szakértő vállalkozások (pl. üzletfejlesztési tanácsadók, műszaki minőségbiztosítók)	Specifikus szakismeret egy-egy területen	(4) Kapcsolatba lép az új ipari technológiákkal (információ)	Eddig ismeretlen terület feltérképezésével

Empirikus eredményeink alapján a technológiafejlesztő(kö)n, a telephelyeken, a nagy energetikai vállalatokon túl a támogató szektorok is igen fontos szerepet játszanak az innovációs ökoszisztémában. Fontos feladat például a P2G-hez kapcsolódó olyan ICT technológiák fejlesztése, amelyek képesek támogatni a K+F folyamatokat, akár távoli vezérléssel, vagy később valós időben hozzáigazítani a rendszerek működését a megújuló energiatermeléshez [68]. Ezek a feladatok az alaptermék újodonságából fakadóan új kihívásokat jelentenek a kapcsolódó szektorok szereplőinek is, melyek megoldásával az ő versenyképességük nőhet.

Konklúzió

Jelen kutatás a P2G technológiafejlesztés eddig nemzetközi szinten is újak számító, versenyképességi vetületeit vizsgálta. Az elméleti keretrendszer felvázolása során megállapítást nyert, hogy az innovációs ökoszisztémák szerepe kulcsfontosságú a szervezeti és a szektorális versenyképesség összekapcsolásában és fejlesztésében is, mely az empirikus adatok alapján a power-to-gas szegmensben, vagy tágabban értelmezve az energetikai szektorban is megerősítést nyert. Az eredmények rámutattak, hogy a nemzetközi és hazai P2G fejlesztési tapasztalatok, továbbá a Nemzeti Energiatársaság 2030 alapján a P2G technológiafejlesztés négy fő területen képes támogatni az energetikai versenyképességet: (1) Karbonsemleges energiatermelés; (2) Energiatárolás és rugalmassági szolgáltatások; (3) Dekarbonizáció; (4) Társadalmi-lakossági értékteremtés.

Korábbi kutatásaink [15] alapján ezen versenyképesség-növelési funkciókhoz egy P2G-fókuszú szervezeti hálózat és ebben a szereplők komplementer erőforrásainak kombinálása vezet. E megállapításra építve az új eredmények két új jelenségre világítottak rá. Illeszkedve Porter elméletéhez [47], az energetikai versenyképességet egy olyan P2G innovációs ökoszisztéma támogathatja, amely nemcsak a szektorban működő vállalatokat foglalja magába, hanem kapcsolódó szektorok (például IT vagy akadémiai szektor) szervezeteit is. Másrészt a P2G innovációs ökoszisztéma szereplői egyaránt képesek saját versenyképességüket is növelni azzal, hogy az innovációs ökoszisztémához csatlakoznak és abban aktívak. Ilyen szervezeti versenyképesség-növelő funkciója van például

- 1) a technológia felskálázásának (ezzel az alaptermék fejlesztője gazdasági növekedést produkálhat),
- 2) a reakciónak a energetikai változásokra (a hagyományos energetikai nagyvállalat innovációs tudáshoz fér hozzá),
- 3) a kapcsolódásnak a leginnovatívabb ipari technológiákhoz (az egyetemek, kutatóközpontok hozzáférnek ipari adatokhoz és naprakész kutatási portfóliót alakíthatnak ki),
- 4) a fogyasztói igények kielégítésének (például a kapcsolódó ICT technológiák fejlesztőinek eddig ismeretlen területen kell fogyasztói problémát megoldani).

Összegezve, a P2G technológia a szezonális energiátároláson túl is hozzájárulhat az energetikai versenyképesség növeléséhez és e potenciál realizálása nemcsak a szektorális versenyképesség fejlesztésével, de az innovációs ökoszisztéma szervezeteinek versenyképesség-növekedésével is hozzájárul a nemzetgazdasági versenyképesség javulásához. Mivel jelen kutatás kvalitatív módszertanra épült, új kutatási irányként a P2G itt azonosított, szektorális versenyképességi vetületeinek kvantifikálása fogalmazható meg. Továbbá, az első hazai P2G üzemek telepítése után érdemes visszatérni is vizsgálni a P2G fejlesztésben résztvevők versenyképességének alakulását és/vagy – a változási aspektusokhoz kapcsolódóan – a döntéshozók „CSR leadership” szerepét [69].

Köszönetnyilvánítás

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

A publikáció a Magyar Nemzeti Bank és a Budapesti Corvinus Egyetem együttműködési megállapodásának keretében alapított és a szerző által elnyert MNB Kutatási Kiválósági Díj támogatásával jött létre.

Hivatkozásjegyzék

- [1] E. Ergüden és E. Çatlioglu, „Sustainability Reporting Practices in Energy Companies With Topsis Method,” *Journal of Accounting & Finance*, pp. 201-221, 2016.
- [2] C. A. Bollino és R. Madlener, „Foreword to the Special Issue on “High Shares of Renewable Energy Sources and Electricity Market Reform”,” *Energy Journal*, 2016 Special Issue, 37, pp. 1-4. <https://doi.org/10.5547/01956574.37.SI2.cbol>, 2016.
- [3] A. M. Adil és Y. Ko, „Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, pp. 1025-1037. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.079>, 2016.
- [4] B. B. Alagoz és A. Kaygusuz, „Dynamic energy pricing by closed-loop fractional-order PI control system and energy balancing in smart grid energy markets,” *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 38 (5), pp. 565-578. <https://doi.org/10.1177/0142331215579949>, 2016.
- [5] M. Costa-Campi, N. Duch-Brown és J. García-Quevedo, „R & D drivers and obstacles to innovation in the energy industry,” *Energy Economics*, 46 (20), pp. 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.09.003>, 2014.
- [6] 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/ijsep.2016.11.21>, 2016.
- [7] A. M. Ahmed, L. Kondor és A. R. Imre, „Thermodynamic Efficiency Maximum of Simple Organic Rankine Cycles,” *Energies*, 14 (2), p. 307. <https://doi.org/10.3390/en14020307>, 2021.
- [8] G. Pintér, H. Zsiborács, N. Hegedűsné Baranyai, A. Vincze és Z. Birkner, „The Economic and Geographical Aspects of the Status of Small-Scale Photovoltaic Systems in Hungary—A Case Study,” *Energies*, 13, p. 3489. <https://doi.org/10.3390/en13133489>, 2020.
- [9] L. Berényi, Z. Birkner és N. Deutsch, „A Multidimensional Evaluation of Renewable and Nuclear Energy among Higher Education Students,” *Sustainability*, 12, p. 1449. <https://doi.org/10.3390/su12041449>, 2020.
- [10] 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.
- [11] Z. Csödő, 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.
- [12] Z. Csödő, „A power-to-gas technológiafejlesztés üzleti modellje Magyarországon,” *Energiagazdálkodás*, 60 (különszám), pp. 17-20, 2019.
- [13] Z. Csödő, „Power-to-Gas: egy ígéretes lehetőség a megújuló energiaforrások integrációjára,” *Zöld Ipar Magazin*, 7 (10), pp. 28-29, 2017.
- [14] 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.
- [15] Z. Csödő 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/ijsep.3388>, 2020.
- [16] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert és T. Kolb, „Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review,” *Renewable Energy*, 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>, 2016.

- [17] M. Zavarkó, „Nemzetközi power-to-gas technológia fejlesztési projektek tanulságai,” *Energiagazdálkodás*, 60 (Különszám), pp. 21-25, 2019.
- [18] G. Kocziszký, M. Veresné Somosi és K. Balaton, „A társadalmi innováció vizsgálatának tapasztalatai és fejlesztési lehetőségei,” *Vezetéstudomány*, 48 (6-7), pp. 15-19. <https://doi.org/10.14267/VEZ-TUD.2017.06.02>, 2017.
- [19] C. Brunner, J. Michaelis és D. Möst, „Competitiveness of Different Operational Concepts for Power-to-Gas in Future Energy Systems,” *Z Energiewirtschaft*, 39, pp. 275–293. <https://doi.org/10.1007/s12398-015-0165-0>, 2015.
- [20] 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.
- [21] P. Collet, E. Flottes és e. al, „Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology,” *Applied Energy*, p. 282–295. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.181, 2017, 192.
- [22] J. Fagerberg, „Technology and competitiveness,” *Oxford Review of Economic Policy*, 12 (3), pp. 39-51., 1996.
- [23] ITM, *Nemzeti Energiestratégia 2030*, 2020.
- [24] A. Nisar, M. Palacios és M. Grijalvo, „Open organizational structures: A new framework for the energy industry,” *Journal of Business Research*, 69 (11), pp. 5175-5179. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.100>, 2016.
- [25] Teece, „Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance,” *Strategic Management Journal*, 28 (13), pp. 319-350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>, 2007.
- [26] M. Hammer, „Deep Change: How Operational Innovation Can Transform Your Company,” *Harvard Business Review*, April, pp. 84-93, 2004.
- [27] J. B. Barney, „Firm resources and sustained competitive advantage,” *Journal of Management*, 17 (1), p. 99–120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>, 1991.
- [28] R. M. Grant, „Prospering in Dynamically-Competitive Environments: Organizational Capabilities as Knowledge Integration,” *Organization Science*, 7 (4), p. 375–387. <https://doi.org/10.1287/orsc.7.4.375>, 1996.
- [29] D. J. Teece, G. Pisano és A. Schuen, „Dynamic capabilities and strategic management,” *Strategic Management Journal*, 18 (7), pp. 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z), 1997.
- [30] Z. Csödő, „Hogyan lássunk neki a stratégiaalkotásnak? Stratégiai megközelítések,” *Kórház*, 14 (10), pp. 32-33, 2007.
- [31] L. E. Greiner, „Evolution and Revolution as Organizations Grow,” *Harvard Business Review*, 50 (4), p. 37–46., 1972.
- [32] J. Millar, A. Demaid és P. Quintas, „Trans-organizational innovation: a framework for research,” *Technology Analysis & Strategic Management*, 9 (4), p. 399–418. <https://doi.org/10.1080/09537329708524294>, 1997.
- [33] C. M. Christensen, M. E. Raynor és R. McDonald, „What Is Disruptive Innovation?,” *Harvard Business Review*, December, pp. 44-53, 2015.
- [34] Z. Csödő, „Útmutató a sikeres változáshoz: a szervezeti változás típusai,” *Kórház*, 14 (9), pp. 56-57, 2007.
- [35] Z. Csödő, „Ha már átalakítunk: mit és hogyan változtassunk,” *Kórház*, 14 (4), pp. 18-19, 2007.
- [36] Z. Csödő, *Szervezeti változás és változásvezetés a folyamatos differenciálódás és integráció tükrében: az innovatív gyógyszeripar példája*, Doktori (PhD) értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, 2006.
- [37] A. Jambor és S. Babu, „Competitiveness: Definitions, Theories and Measurement,” in *Competitiveness of Global Agriculture*, Cham, Springer, 2016, pp. 25-45. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44876-3_3.
- [38] E. Czákó, *Versenyképesség iparágak szintjén - a globalizáció tükrében = Competitiveness at Industry Level - In the Light of Globalization*, Doktori (PhD) értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Gazdálkodástani Doktori Iskola., 2000.
- [39] J. Cantwell, „Innovation and Competitiveness,” in *The Oxford Handbook of Innovation* (eds Fagerber, J.; Mowery, D. C.; Nelson, R. R., New York, Oxford University Press, 2005, pp. 543-567..
- [40] R. Feurer és K. Chaharbaghi, „Defining Competitiveness: A Holistic Approach,” *Management Decision*, 32 (2), pp. 49-58. <https://doi.org/10.1108/00251749410054819>, 1994.
- [41] J. Falciola, M. Jansen és V. Rollo, „Defining firm competitiveness: A multidimensional framework,” *World Development*, 129, p. 104857. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104857>, 2020.
- [42] J. Tidd, J. Bessant és K. Pavitt, *Managing Innovation*, Chichester: Wiley, 1997.
- [43] D. J. Teece, „Profiting from technological innovation: implications for integration, collaboration, licensing and public policy,” *Research Policy*, 15 (6), pp. 285–305. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(86\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0048-7333(86)90027-2), 1986.
- [44] J. Boyer, „Toward an Evolutionary and Sustainability Perspective of the Innovation Ecosystem: Revisiting the Panarchy Model,” *Sustainability*, 12 (8), p. 3232. <https://doi.org/10.3390/su12083232>, 2020.
- [45] J. J. Ferreira, C. I. Fernandes és V. Ratten, „Entrepreneurship, innovation and competitiveness: what is the connection?,” *International Journal of Business and Globalisation*, 18 (1), p. 73. <https://doi.org/10.1504/ijbg.2017.081030>, 2017.
- [46] C. Mascarenhas, J. J. Ferreira és C. Marques, „University–industry cooperation: A systematic literature review and research agenda,” *Science and Public Policy*, 45 (5), p. 708–718. <https://doi.org/10.1093/scipol/scy003>, 2018.
- [47] M. E. Porter, *Competitive Advantage of Nations*, New York: The Free Press, 1990.
- [48] G. P. Pisano és W. C. Shih, „Restoring American Competitiveness,” *Harvard Business Review*, 87 (7-8), pp. 1-14, 2009.
- [49] J. Clark és K. Guy, „Innovation and competitiveness: a review,” *Technology Analysis & Strategic Management*, 10 (3), pp. 363-395. <https://doi.org/10.1080/09537329808524322>, 1998.
- [50] K. Schwab és S. Zahidi, „The Global Competitiveness Report SPECIAL EDITION 2020 How Countries are Performing on the Road to Recovery,” *World Economic Forum*, Cologny/Geneva, 2020.
- [51] K. Schwab, „The Global Competitiveness Report 2019,” *World Economic Forum*, Cologny/Geneva, 2019.
- [52] G. Kocziszký és M. Veresné Somosi, „Közösségi tulajdonú (nem pénzügyi) gazdasági társaságok fenntarthatóságának vizsgálata,” *Pénzügyi Szemle*, 65 (Különszám), pp. 44-76. https://doi.org/10.35551/PSZ_2020_k_1_3, 2020.
- [53] S. Berke és G. Tóth, „Felelős vállalat vagy „csak” felelős vezető?,” *Lépések: A fenntarthatóság felé*, 25 (1), pp. 14-15, 2020.
- [54] P. Möbius és W. Althammer, „Sustainable competitiveness: a spatial econometric analysis of European regions,” *Journal of Environmental Planning and Management*, 63 (3), pp. 453-480. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1593005>, 2020.
- [55] K. Lewin, „Action research and minority problems,” *Journal of Social Issues*, 2 (4), pp. 34-46. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x>, 1946.
- [56] P. Reason, *Handbook of action research: participative inquiry and practice*, London: SAGE, 2001.
- [57] J. McNiff, *Action Research - Principles and practice*, London: Routledge, 2013.
- [58] B. Glaser és A. Strauss, *The Discovery of Grounded theory: Strategies for Qualitative Research*, Chicago: Aldine, 1967.
- [59] A. Strauss és J. Corbin, *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*, Thousand Oaks: Sage Publications, 1998.
- [60] STORE&GO Project, „Results and publications of the project,” 2021. [Online]. Available: <https://www.storeandgo.info>. [Hozzáférés dátuma: 07 01 2021].
- [61] C. Jepma, C. van Leeuwen és D. Hulshof, „D8.1. Exploring the future for green gases,” *STORE&GO*, 2017.
- [62] A. J. Van der Welle, M. De Nooij és M. Mozaffarian, „Full socio-economic costs and benefits of energy mix diversification and the role of power-to-gas in this regard,” *STORE&GO Project*, 2018.
- [63] E. Bompard, S. Bensaid, G. Chicco és A. Mazza, „Report on the model of the power system with P2G,” *STORE&GO Project*, 2018.
- [64] P. Oosterkamp, „Full CBA Analysis of Power-to-Gas in the context of various reference scenarios,” *STORE&GO Project*, 2018.
- [65] H. Blanco, „Report on full CBA based on the relevant environmental impact data,” *STORE&GO Project*, 2018.
- [66] V. Azarova, J. Cohen, C. Friedl és J. Reichl, „Report on social and public acceptance determinants in selected EU-countries,” *STORE&GO Project*, 2019.
- [67] Z. Csödő, „A power-to-gas technológiafejlesztés tapasztalatai Magyarországon,” *Energiagazdálkodás*, 61 (5-6), p. 16, 2020.
- [68] H. Lok, „Real Time Implementation of Grid Models,” *STORE&GO Project*, 2019.
- [69] R. Adnan Al Danaf és S. Berke, „CSR Leadership,” in *Koponiczné Györke, D.; Barna, R. (eds.): Proceedings of the International Conference on Sustainable Economy and Agriculture*, Kaposvár, Magyarország, Kaposvár University, Faculty of Economic Science, 2020, pp. 389-398.

Gáztárolás adszorpciós elven?

Dr. Domán Andrea

tudományos segédmunkatárs, andidoman@gmail.com

Samantha K. Samaniego A.

PhD-hallgató, samikathi@gmail.com

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék

Hancz Aliz

MSc hallgató, hanczaliz@gmail.com

Prof. Dr. László Krisztina

egyetemi tanár, laszlo.krisztina@vbk.bme.hu

A metán a környezeti-ökológiai szempontból legtisztábbnak tartott fosszilis energia-forrás. Jelenleg is jelentős mennyiségben áll rendelkezésünkre és a megújuló biomasszából is megfelelő koncentrációban nyerhető ki A nagynyomású (CNG), illetve kriogén (LNG) gáztárolási módszerek, bár technikai és biztonsági okok miatt nem ideálisak, lényegesen növelik a metán energiasűrűségét. Ez a rövid áttekintés a biztonságosabb és gazdaságilag is megfelelő alternatívának ígérkező adszorpciós elvű gáztárolás (adsorbed natural gas, ANG) technikai kihívásait veszi számba.

*

Methane is considered to be the greenest fossile energy source. It is not only available in form of natural gas but can also be obtained with a reasonable yield by the conversation of the renewable biomass. High pressure and cryogenic CNG and LNG technologies may help to upgrade the low energy density of methane for various applications including transportation. Here we briefly discuss the challenges of a safer and expectedly more reasonable gas storage technology based on adsorption principle (ANG).

A nem fosszilis eredetű energiaforrások (pl. a nukleáris energia, vízi, nap- és szélerőművek) egyre szélesebb körű felhasználása ellenére változatlanul növekszik az igény a fosszilis eredetű energiahordozók iránt is (1. ábra). A legzöldebbnek tekintett fosszilis energiaforrás a metán, mely többfajta természetes forrásból is nagy mennyiségben áll rendelkezésünkre. A földgáz fő komponense (1. táblázat), vízzel alkotott zárványvegyületei, a klatrárok nagy mennyiségben fordulnak elő az óceánok mélyén és a permafroszt területeken. A Nyugat-Szibéria területén klatrárként található me-

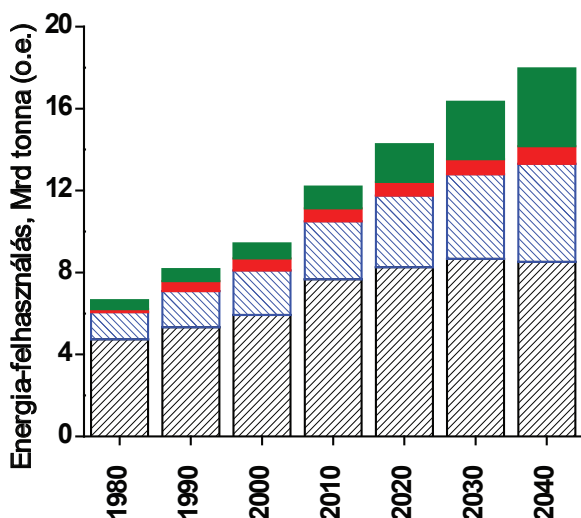
tán-kincset néhány éve 10^{10} - 10^{11} tonnára becsülték. A megújuló biomasszából is előállítható technikai felhasználásra alkalmas metántartalmú biogáz. A nyers biogázok összetételét ugyan kiindulási anyagaik determinálják, fő komponensként 50-75 térfogat% metánból, 25-50% széndioxidból és 2-8% nitrogénből állnak, nyomokban kénhidrogént, ammóniát, hidrogént és illékony szerves vegyületeket tartalmazhatnak [3].

1. táblázat. A földgáz összetétele [2]

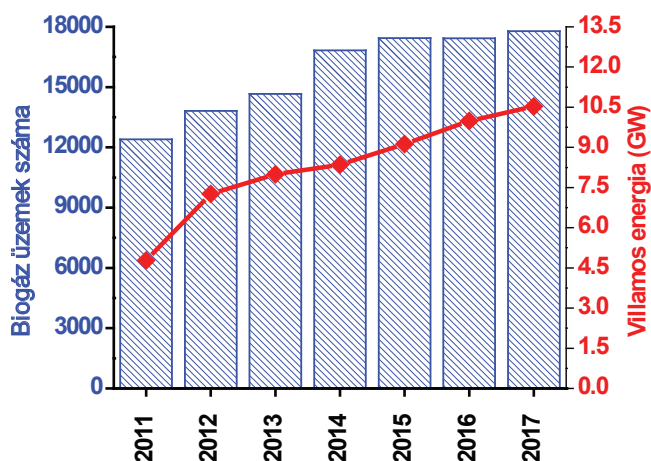
Metán	CH ₄	70-90%
Etán	C ₂ H ₆	0-20%
Propán	C ₃ H ₈	
Bután	C ₄ H ₁₀	
Széndioxid	CO ₂	0-8%
Oxigén	O ₂	0-0,2%
Nitrogén	N ₂	0-5%
Kénhidrogén	H ₂ S	0-5%
Nemesgázok	Ar, He, Ne, Xe	nyomokban

A biogáz üzemek haszna tehát kettős: egyrészt a hulladékgazdálkodásra nehezedő teher csökkentése, másrészt az alternatív üzemanyagként szolgáló metán gazdaságos mennyiségű előállítása. A 2. ábra az Európai Unióban működő biomasszát felhasználó létesítmények számának és az általuk szolgáltatott elektromos energia közelmúltbeli alakulását szemlélteti [4]. A fejlődés töretlen: 2019 végére már 18 943 biogáz üzem ezen belül 725 biometán üzem működött Európában [5].

Az országos vagy lokális hálózatokba be nem kötött vagy köthető biogáz üzemekben többé-kevésbé folyamatosan termelődő metán nem feltétlenül kerül azonnal felhasználásra, így felmerül az ideiglenes tárolás igénye.



1. ábra. Az olajjegetőértékre átszámolt (o.e.) energiefelhasználása alakulása [1]



2. ábra. A biogáz üzemek számának és energia-termelésének alakulása az Európai Unióban [4]

A metán a gazdaság számos területén, ezen belül az igen jelentős energiaigényű közlekedési szektorban is egyre növekvő potenciállal bír. A gépjárművek üzemanyagként történő felhasználása során ugyanakkor a gépjármű konstrukciója és a biztonsági megfontolások erősen behatárolják a karosszériában elhelyezhető gáz mennyiségét, mind a térfogat, mind a tömeg szempontjából. Fontos tényező a jármű elvárható mobilitási hatótávolsága, illetve az újratöltés lehetősége (kúthálózat sűrűsége).

Egy 2004-ben publikált adatsor szerint az Európai Unióban az energia több, mint 30%-át a közlekedési szektor használja fel. A metán meghajtású gépjárművek 20%-kal kevesebb CO₂-t, 70%-kal kevesebb CO-t, 87%-kal kevesebb szerves anyagot („nem-metán”) és 87%-kal kevesebb nitrogén-oxidot bocsátanak ki a hagyományos üzemanyaggal meghajtott gépjárművekhez képest [6].

A földgáz energiasűrűsége halmazállapotából adódóan kb. három nagyságrenddel kisebb, mint a folyékony üzemanyagoké, ezért terjedtek/terjednek el az atmoszférikus nyomástól vagy a közönséges hőmérséklettel jelentősen eltérő tulajdonságú tárolási és felhasználási technológiák.

A már számos országban – így Magyarországon is elérhető – nagynyomású földgáz (compressed natural gas, CNG) 20–25 MPa nyomása megfelelő falvastagságú nyomásálló hengeres vagy gömb alakú tartályt és természetesen speciális, többfokozatú kompresszort igényel. Gépjárműveknél a CNG a jelenlegi körülmények mellett maximum 300 km utazási távolságot tesz lehetővé, mert energiataralma kb. 26%-a az azonos térfogatú cseppfolyós üzemanyagénak. A földgáz kondenzálásával az energiataralom ugyan háromszorosára növelhető, de a cseppfolyósított földgáz (liquified natural gas, LNG) nemcsak robusztus, de a metán forráspontjának megfelelő -160 °C alatti hőmérsékletet biztosító jó hőszigetelésű üzemanyagtartályt igényel. Az üzemanyagot tehát a töltés napján célszerűen fel kell használni. Ezért és a tartály nagy tömege miatt LNG-vel csak a nagy teherbírású járművek üzemeltethetők. A komprimált és a cseppfolyósított gáz technológia a biogázok felhasználása kapcsán is terjed: a biogazdaság rohamosan fejlődő szektora a bio-LNG és bio-CNG (sic!) [5].

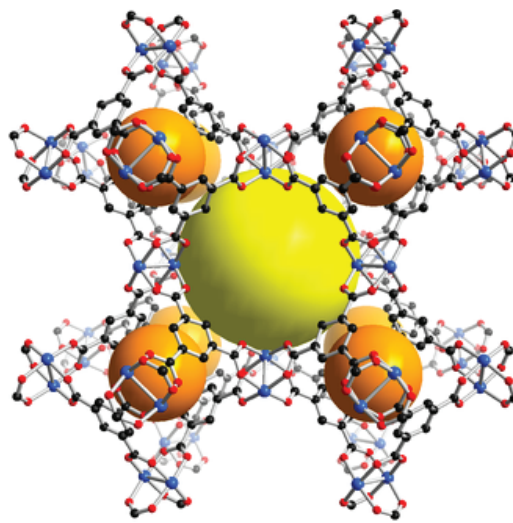
Mindezek ellenére, a nagynyomású (CNG), illetve kriogén (LNG) gáztárolási módszerek technikai és biztonsági okok miatt nem ideálisak. Ígéretes, biztonságosabb és gazdaságilag is megfelelőbb alternatívának ígérkezik az adszorpciós elven alapuló tárolás (adsorbed natural gas, ANG, vagy akár a bio-ANG). Ebben az esetben mind a nyomással, mind a hőmérséklettel szemben mérsékeltebbek az igények (3,5–6,5 MPa, közönséges hőmérséklet). Az Egyesült Államok energetikai hivatala (Department of Energy, DOE) 1995-ben határozta meg először, majd 2000-ben finomította tovább azt a tárolási kapacitásként megfogalmazott irányszámot, amelynek teljesülése esetén az adszorpciós elvű gáztárolás már gazdaságilag is reális alternatívát jelent [7]. Ennek értelmében az autópálya alkalmazás akkor válik megvalósíthatóvá, ha az üzemanyagtartály 3,5 MPa nyomáson és 25 °C hőmérsékleten saját térfogatának 263-szorosát meghaladó mennyiségű gázt képes leadni. Vegyük észre, hogy ez nem a tárolt és nem is a megkötött, hanem a tankból felhasználható mennyiség [8]. Tömegre átváltva 0,5 g/g-nak felel meg. A célszámot 3,5 MPa nyomásra modellezték. Ekkor a technikai megvalósítása ugyanis még nem igényel sem különleges anyagú és alakú tartályt, sem többlépcsős kompresszort, a tartály alakja és térfogata akár hasonló lehet a jelenleg elterjedthez is. A biztonságtechnikai megfontolások ugyancsak az adszorpciós eljárás mellett szólnak. A három technológia legfontosabb jellemzőit foglalja össze a 2. táblázat.

2. táblázat. A nagynyomású, a kriogén és az adszorpciós gáztárolás néhány jellemzőjének összehasonlítása

	CNG	LNG	ANG
Nyomás, MPa	20-25	1	3,5-6,5
Hőmérséklet, °C	25	-160	25
Energiasűrűség, %*	26	72	19
Technológiai igény	nyomásálló tartály, többfokozatú kompresszor	hőszigetelt tartály	megfelelő adszorbens

* a hagyományos üzemanyagokhoz képest

A DOE irányszámai komoly kihívások elé állítják az adszorbens-fejlesztést. Legígéretesebbek az ún. nanopórusos anyagok, melyek az 1 nm-nél kisebb méretű metán molekulákat nagy mennyiségben, kizárólag fizikai kölcsönhatások útján képesek tárolni. Az adszorpciós gáztárolásra irányuló kutatások nemcsak a már ismert szorbensek, így az aktív szén fejlesztésében jelöltek ki új irányt, de egy új, extrém nagy fajlagos felületű anyagcsaládban, a fémorganikus térhálókban (metal organic framework, MOF) rejlő lehetőségek feltárásának is eddig nem látott lendületet adtak. A MOFokban fém vagy fémoxid klaszterek és szerves összekötő molekulák alakítják ki a nagy porozitású 3D térhálós rendszert [9]. A metán tárolására legígéretesebb HKUST-1 fantázianevű fémorganikus térháló Basolite® C 300 néven már kereskedelmi forgalomban is megjelent (3. ábra).



3. ábra. A HKUST-1 fantázianevű MOF. A kék gömbök a réz, a piros az oxigén, a fekete gömböcskék a szén atomokat jelzik. A nagyméretű sárga és narancssárga gömbök a metán tárolására szolgáló, eltérő méretű pórusok által biztosított szabad térfogatot jelzik [10].

A kifejlesztésre váró adszorbenssel szembeni elvárások a következők [1]:

1. **Nagy metán adszorpciós kapacitást biztosító pórusszerkezet**
Az adszorpció erőssége és a tárolási kapacitás megfelelő összhangja a pórusméret-eloszlás optimalizálásával érhető el. A túl szűk pórusok ugyan növelik az adszorpciós kapacitást, de megnehezítik a megkötött gáz kinyerését. Komplex, mikro- és szűk mezopórusokat tartalmazó pórusrendszerre van szükség¹. Mivel a gömbszerűnek

¹ Az IUPAC ajánlása szerint a 2 nm-nél szűkebb pórusok megnevezése mikropórus, 2 és 50 nm közöttiek a mezopórusok és az 50 nm-nél tágabb pórusokat hívják makropórusnak [11]. A 0,7 nm-nél szűkebb pórusokat ultramikropórusnak is hívják.

3. táblázat. Néhány kiemelkedő metán megkötő képességű adszorbens

Adszorbens		Névleges felület*	Pórus-térfogat*	Mikropórus-térfogat*	Térfogat-súly	Váz-sűrűség	Tárolási	Kinyerhető	Hivatkozás	
							kapacitás			
							cm ³ /cm ³	g/g		cm ³ /cm ³
F400	Kereskedelmi aktív szén	1070	0,55	0,40	0,91	2,18	144	0,11	90	[8]
Maxsorb		1800	0,83	0,64	0,67	2,22	169	0,18	123	[8]
RGC30		1440	1,13	0,52	0,59	1,90	133	0,16	97	[8]
LMA405	Aktív szén	3551	2,00	1,00	0,45	2,20	177	0,28	135	[8]
LMA738		3290	2,25	1,10	0,53	1,80	221	0,30	174	[8]
LMA726		3425	2,44	1,11	0,54	1,90	209	0,28	160	[8]
NU-111	MOF	4930	2,09	n.a.	0,409	n.a.	206	0,36	179	[12]
HKUST-1		1680	0,70	0,66	0,88	2,80	273	0,22	200	[12]
DOE cél							263	0,5	263	[7]

*N₂ gőz adszorpció adatokból (-196 °C)

tekinthető metánmolekulák nagyobb sűrűséggel tudják kitölteni a rés alakú pórusokat, mint a hengereket, így az előbbi pórusalak hatékonyabb lehet a metán és a hozzá hasonló szuperkritikus gázok tárolására.

2. Gyors adszorpció/deszorpció kinetika

A követelmény önmagáért beszél. Ennek megfelelően vagy közvetlenül a részecskék külső felületéről elérhető mikropórusokat kell kialakítani, vagy megfelelő méreteloszlású pórusrendszert kell kialakítani a gyors hozzáférés biztosítására. A legígéretebbnek a hierarchikus pórusszerkezetű, ultramikropórusokat és mezopórusokat tartalmazó monolitokat tartják.

3. Reverzibilis működés

A tárolási és felhasználható kapacitás állandó kell maradjon a működés során. Az adszorbenshez a metánnál erősebben kötődő szennyezők az idő előrehaladtával ronthatják a reverzibilitást.

4. Térfogatsúly

Szemcsés anyagokban a szemcsék közti teret általában nem adszorbeált, hanem a tárolási körülmények (hőmérséklet, nyomás) által meghatározott állapotú gáz tölti ki, rontva a tárolási kapacitást. Ebből a szempontból is előnyösebbek tehát a monolitok. Gondot jelenthet azonban az adszorpció, illetve deszorpció során a folyamatok exoterm, illetve endoterm jellegéből adódó termikus valamint mechanikai igénybevétel (hőtágulás, zsugorodás, mechanikai feszültség) és az ennek következtében kialakuló kapacitásbeli változások.

5. Mechanikai és kémiai stabilitás

A mobilitással járó rázkódás okozta erózió az adszorbens aprózódásához vezethet, ami a kapacitások csökkenését vonja maga után (ld. térfogatsúly). A töltet nem léphet kémiai reakcióba sem a metánnal, sem annak esetleges szennyezőivel.

6. Hővezetőképesség

Amennyiben az adszorpció (töltési ciklus) során fejlődő hő felmelegedést okoz, ez csökkenti a töltési kapacitást. A felhasználás során a deszorpció viszont ellentétes hatást idéz elő, a hőmérsékletet csökkentve csökkenti a kinyerhető üzemanyag mennyiségét. Ezért is különös figyelmet kell fordítani a megfelelő hővezetőképességű szorbens kialakítására.

A szorbensek tulajdonságainak optimalizálása a felsorolt számos szempont szerint komoly kihívás elé állítja a kutatókat és mérnököket egyaránt. A 3. táblázatban néhány ígéretes aktív szén és MOF textúrájára jellemző adatot hasonlítottunk össze.

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

Hivatkozásjegyzék

1. K. Kaneko. F. Rodriguez-Reinoso (eds.) Nanoporous Materials for Gas Storage, Green Energy and Technology, Springer, 2019
2. NaturalGas.org. <http://naturalgas.org/overview/background/> (utolsó megtekintés: 2021. 03. 30.)
3. Y. Li, C.P. Alaimo, M. Kim, N. Y. Kado, J. Peppers, J. Xue, C. Wan, P. G. Green, R. Zhang, B. M. Jenkins, C. F.-A. Vogel, S. Wuertz, T. M. Young, M. J. Kleeman: Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California. Environmental Science and Technology, 2019, 53, 11569-11579.
4. EBA Statistical Report 2018 (utolsó megtekintés: 2021. 03. 30.)
5. EBA Statistical Report 2020 (utolsó megtekintés: 2021. 03. 30.)
6. How you can benefit from CNG conversion. CNG United, San Clemente, CA. <http://www.cngunited.com/support/howyoucanbenefitfromcngconversion>. (utolsó megtekintés: 2018. március)
7. DOE MOVE program at <http://arpa-e.energy.gov/>; Methane Opportunities for Vehicular Energy, Advanced Research Project Agency-Energy, U.S. Dept. of Energy, Funding Opportunity No. DE-FOA-0000672, 2012.
8. M. E. Casco, M. Martínez-Escandell, E. Gadea-Ramos, K. Kaneko, J. Silvestre-Albero, F. Rodríguez-Reinoso: High-Pressure Methane Storage in Porous Materials: Are Carbon Materials in the Pole Position? Chem. Mater. 2015, 27, 959–964.
9. Domán Andrea: Fémorganikus térháló – nanostrukturált szén kompozitok. PhD Értekezés; BME Oláh György Doktori Iskola, 2021
10. Tony Boehle ábrája, letöltve a <https://en.wikipedia.org/wiki/HKUST-1> címről (utolsó megtekintés 2021. március 30.)
11. M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark, J. P. Olivier, J. F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, K. S. W. Sing: Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution. (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem. 2015, 87, 1051–1069.
12. Y. Peng, V. Krungleviciute, I. Eryazici, J. T. Hupp, O. K. Farha, T. Yildirim: Methane Storage in Metal–Organic Frameworks: Current Records, Surprise Findings, and Challenges. J. Am. Chem. Soc. 2013, 135, 11887–11894.

Szezonális és hosszútávú energiatárolási lehetőségek

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

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

Kummer Kristóf^{1,2}

MSc hallgató, EK2 ösztöndíjas

¹ BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

² Energiatudományi Kutatóközpont

Az energiatárolás egyik célja az időjárásfüggés miatt ingadozó energiatermelés és a szintén ingadozó igények közti különbség kiszolgálása. Az egy napon belüli, napi szintű, illetve heti szintű tárolási feladatokra mind időtartamban, mind kapacitás-ban jól használhatók az akkumulátoros rendszerek. Szezonális és ennél is hosszabb, éves-több éves tárolásnál viszont ezek a típusok nem megfelelőek. Bemutatjuk, hogy melyek azok a szempontok, amik alapján a hosszútávú (féléves-többéves) energiatárolásban az úgynevezett Power-to-Methane alapú technológia jobb lehet a többi, ma ismert és piacképes módszerekénél.

*

One of the goals of energy storage is to reduce the imbalance between energy production that fluctuates due to weather dependence and the also fluctuating energy demand. Battery systems can be used for day-to-day, daily and weekly storage tasks in terms of duration as well as storage capacity. However, for seasonal and even longer, year-to-year storage, these types are not suitable. We present several aspects to show the conditional superiority of the Power-to-Methane-based energy storage technology in long-term (half-to-several years) energy storage over some of the other commercially available storage methods.

Rövid és hosszútávú energiatárolás

Az energiatárolás célja, hogy a fel nem használt villamos energiát valamilyen formában eltároljuk, majd később felhasználjuk. Ez a felhasználás történhet úgy, hogy visszanyerjük a betárolt villamos energia visszanyerhető részét és azt használjuk fel, de egy jogszabály-változás miatt az is energiatárolásnak számít, ha az energia betárolásakor előállított közti terméket (pl. hidrogént) üzemanyagként használjuk fel [1]. A jelenlegi cikkben csak azzal a változattal foglalkozunk, ahol mind az input, mind az output villamos energia lesz; az üzemanyagként való felhasználhatóságot csak mint extra lehetőséget említjük meg ott, ahol ez releváns.

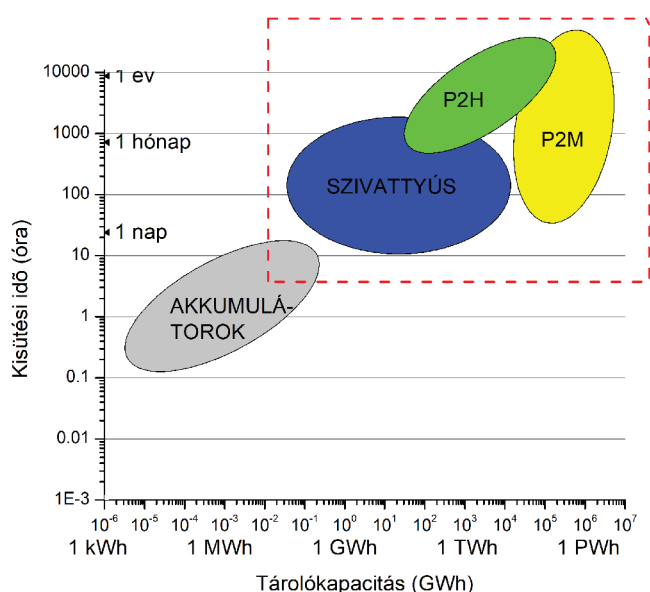
A tárolás sokféleképp történhet [2,3,4]; legegyszerűbbnek talán az tűnne, hogy a villamos energiát változtatás nélkül, villamos energiaként tároljuk el (szuperkondenzátorokban vagy szupravezető gyűrűben), de ezek a megoldások általában költségesek és viszonylag kis tárolókapacitásúak.

Szerencsére vannak más, kevésbé költséges és/vagy nagyobb tárolókapacitású megoldások is, ezeknél viszont a villamosenergiát először át kell alakítani egy más energiaformává, majd visszaalakítani; ez az oda-vissza alakítás veszteséggel jár és speciális berendezés vagy berendezések kellene hozzá. Az egyik ilyen módszer a mechanikai energiatárolás, amikor a tárolandó villamos energiát vagy helyzeti (pl. szivattyús víztározók), vagy mozgási (pl. lendkeres tározó) alakítunk át, majd ezt a helyzeti vagy mozgási energiát generátorok segítségével visszaalakítjuk villamos energiává. Ugyancsak megoldható az energiatárolás kémiai úton is; ekkor a

villamos energia felhasználásával üzemanyagot állítunk elő, vagy egy, már létező üzemanyag energiatartalmát növeljük. Ennek talán legismertebb formája a hidrogén előállítása elektrolitikus vízbontással; itt a keletkező hidrogénből a villamos energia, például üzemanyagcella alkalmazásával nyerhető vissza. Szintén kémiai módszer, de történelmi és technológiai okokból külön kategória az elektrokémiai tárolás, amikor villamos energia segítségével, egy elektrokémiai folyamatban egy reverzibilis elektrokémiai folyamat energiát tárolhatunk el, majd a folyamatot megfordítva a tárolt energiát – vagy legalábbis nagyrészét – kinyerjük. Ilyen elven működnek az akkumulátorok. Meg kell említenünk még az úgynevezett hőtárolókat; a hőtárolást nem szokták az energiatároláshoz sorolni, mert általában sem a bemenő, sem a kimenő „termék” nem villamos energia. Napjainkban ez változik; előfordul, hogy akkora a villamosenergia-túlermelés, hogy megéri belőle hőt előállítani és azt később felhasználni (ekkor az input már villamos energia). Ekkor lehetséges – bár csak alacsony határfokkal – hogy a hőből később újra villamos energiát állítsanak elő, pl. egy szerves Rankine ciklusú berendezés beiktatásával [5].

Az energiatárolásra leginkább az időjárásfüggés miatt ingadozó energiatermelés és a szintén ingadozó igények közti különbség kiegyenlítése miatt van szükség. Mint ezt az EUROSTAT adataiból Hiesl és szerzőtársai megmutatták [6], az EU-28-on belüli megújuló alapú villamosenergia-termelés (a hagyományos típusú vízi energiát leszámítva) súlya 1%-ról 20%-ra nőtt. Az adott időszakban arányaiban a legnagyobb növekedés a napenergia-alapú (PV) termelésnél volt, míg 2018-ban a legnagyobb súlya a hazánkban kevésbé jelentős szélenergiának volt. Ezeknél a megújulóknál (biomassza, biogáz, bio-folyadék és egyéb bio-eredetű hulladék, szélenergia (off- és on-shore típus), árapály, geotermikus), valamint a felmérésben figyelmen kívül hagyott hagyományos – azaz folyókra épített – vízenergia esetében majdnem mindig megfigyelhető valamilyen időjárásfüggés. Ez a nap- és szélenergiánál akár rövid távon is nagy termelés-beli változásokat okozhat, de más esetekben is megfigyelhető hosszabb távú függés. Így pl. a biológiai eredetű anyagoknál az alapanyagok megtermelése (ennek mennyisége, minősége) függ szezonális szinten az időjárástól, míg a hagyományos vízenergiánál szintén a hetes-hónapos, illetve szezonális időjárás (esőzés, aszály) hat a termelésre. Meglepő, de még a geotermikus alapú villamosenergia-termelésnél is van időjárás-függés; pl. az ilyen hőforrásoknál gyakran használt ORC-alapú erőműveknél a kondenzátor hőmérsékletét és ezen keresztül az egész berendezés hatásfokát a levegő vagy a felszíni vizek időjárásfüggő változása. Amikor időjárásfüggés miatti tárolási vagy kiegyenlítési problémákról beszélünk, hajlamosak vagyunk az egy napon belüli (pl. felhő a nap előtt), napi szintű (éjszaka nem termel a napelem), illetve heti szintű (szombat-vasárnap sok ipari felhasználó fogyasztása leesik) megoldásokra gondolni. Az ilyen tárolási feladatokra (mind időtartamban, mind kapacitás-ban) jól használhatók az akkumulátoros, pl. Li-ionos rendszerek. Amennyiben viszont már szezonális (téli-nyári

termelési és fogyasztási különbségek miatti), vagy esetleg hosszabb távú (több éves) tárolásra van szükség – azaz a feladat a tényleges tárolás, nem az aktuális ingadozások kiszabályozása – ezek a tárolási típusok nem megfelelőek. Ennek egyik oka az önkisülésük, ami miatt a bennük tárolt energia folyamatosan csökken, másrészt pedig a szezonális vagy éves szintű tároláskor előforduló tárolási kapacitás-igények. A tárolási kapacitás függvényében gyakran adják meg, hogy egy adott tárolási módszer jelenleg piacon levő típusai meddig lennének képesek folyamatosan ellátni a hozzájuk kapcsolt fogyasztót; egy ilyen diagram látható az 1. ábrán. Ebben az esetben a kimenő teljesítményt általában nem definiálják, pedig nem mindegy, hogy egy kis lakóházat, vagy egy teljes ipartelepét kell az adott tárolónak ellátnia. Általában azt feltételezik, hogy az adott tárolók már használatban levő példányainál használt visszaalakítási megoldáshoz tartozó maximális, vagy ahhoz közeli teljesítmény a kijövő teljesítmény; az ebben rejlő bizonytalanságot jól elrejteti a diagram dupla logaritmikus volta. Példaként, egy kereskedelmi forgalomban levő, 21 tonnás, konténer méretű nátrium-kén (NaS) akkumulátor-egység maximális tárolási kapacitása 1,2 MWh, amit általában teljesen ki is használnak; a maximális kijövő teljesítménye 200 kW, de gyakori, hogy ennek csak a felét veszik ki (ez alá ennél a típusnál ritkán mennek) [7]. Így a kisütési idő 6-12 óra, tehát az ábrán ez a típus a szürke ellipszisen belül, a 1-1,2 MWh és a 6-12 óra között lenne egy nem éles határú kis „paca”.



1. ábra. Különböző energiatárolási módszerek sematikus kisütési idő – tárolási kapacitás diagramja ([6] alapján). A piros téglalap a hosszú távú energiatárolás régióját jelzi.

Ez alapján az ábra alapján azt lehet eldönteni, hogy egy már feltöltött tároló a kisütés megkezdésétől kezdve mennyi ideig tudja el ellátni a fogyasztót, többé-kevésbé egyenletes (vagy a logaritmikus skála miatt, legalább egy nagyságrendben levő) teljesítményt feltételezve.

Egy másik, idő-jellegű leíró, amit energiatárolóknál használnak, az maga a berendezés élettartama. Ezt gyakran adják meg maximális ciklusszámban (a ciklus egy feltöltés és kisütés), ekkor az állandó használat melletti időtartamot ezen ciklusszám és a feltöltési-kisütési idő szorzataként kapjuk meg, de gyakran megtörténik, hogy a használatban nem levő tárolóberendezés élettartamát adják

meg, ez az ún. *shelf-life* [8]. Ez utóbbi megadása főként az akkumulátorokra jellemző; az sokakat érdekel, hogy egy használaton kívüli akkumulátort még meddig lehet használni, az már kevésbé, hogy egy használaton kívüli szivattyús tározó száraz medre meddig lesz még vízzáró.

A cikkünkben egy új idő-jellegű mennyiséget szeretnénk bemutatni, ami az idő-függőség mellett még tárolási hatásfok-függő is. Ez a mennyiség azt mutatja meg, hogy egy adott tárolótípust feltöltve, majd a feltöltés után „t” ideig, szándékos kisütés nélkül tárolva, az idő függvényében a betárolt energia hányad részét kapjuk vissza. Ez a mennyiség főként szezonális vagy éves-többéves tárolásnál lesz fontos, ugyanis nem mindegy, hogy egy verőfényes nyár fotovoltaikus úton megtermelt energiáját 4 hónapnyi használat nélküli tárolás után mekkora részben tudunk még visszanyerni.

A cikkben bemutatjuk, hogy a nagykapacitású tárolási módszerek között energetikailag és valószínűleg gazdaságilag is jelenleg az úgynevezett Power-to-Methane alapú technológia (amelyben az eltárolandó villamos energia segítségével vízből és széndioxidból metánt állítanak elő, majd a kitárolásnál ennek felhasználásával állítanak elő villamos energiát) tűnik a legígéretesebbnek, amennyiben a tárolási idő meghaladja a fél-egy éves időtartamot.

Aktuális kitárolhatósági állapot

A bevezetendő mennyiséget aktuális kitárolhatósági állapot függvénynek neveztük el. A megértéséhez általánosítani kell az „önkisülést”, amit főként szuperkondenzátoros vagy akkumulátoros tárolókra használnak. Önkisüléskor a tárolóberendezésben terheletlen állapotban is csökken a benne tárolt energia mennyisége; ez akkumulátoroknál általában valamilyen kémiai reakció miatt történik meg. Ez a legtöbb akkumulátortípusnál pár tized százalék/nap, de egyes esetekben (mint pl. bekapcsolt redox folyadékkáramú akkumulátornál) a napi 10%-ot is elérheti [2].

Az általánosításnak két iránya van. Egyrészt egyes esetekben az úgynevezett standby energiavesztés, ami a tároló működéséhez szükséges segédberendezések fogyasztását jellemzi, fizikailag nem választható el vagy nem érdemes elválasztani az önkisülési veszteségektől; ilyen pl. a nátrium-kén akkumulátor esete, amikor a feltöltési-kisütési 6-12 órás ciklusokban az önkisülési folyamatok disszipációs hője tartja folyékonyan a nátrium és kén elektródot, míg abban az esetben, ha sem feltöltés, sem kisülés nem történik, ezt egy segédűtéssel kell megoldanunk, napi szinten kb. 3% veszteséget okozva. A kétfajta veszteség ugyan fizikailag elkülöníthető, de mivel a két veszteség hatása ugyanaz, ezért az elkülönítésnek nincs értelme.

A másik általánosítás a kondenzátorokról, illetve akkumulátorokról való kiterjesztés más tárolókra is. Könnyen belátható, hogy egy szivattyús tárolónál a párolgási és szivárgási veszteségek, egy power-to-gas tárolónál az elszivárgó gáz, egy power-to-liquid tárolónál az esetlegesen elpárolgó vagy elszivárgó folyadék vagy az általában komplex molekuláris szerkezet degradációja az akkumulátorok önkisüléséhez hasonlatos veszteséget okoz, ami szintén időfüggő. Ilyen veszteség még súlytárolóknál is előfordulhat, bár ott rövid távon inkább véletlenszerű folyamat felelhet érte (pl. leesik pár kődarab a súlytárolónak használt vasúti kocsiról), de extrém hosszú távokon már állandóbb jellegű veszteségek is lehetnek (pl. a magára hagyott súly-torony betonelemei porladni-erodálódni kezdenek). A veszteség időben akumulálódik, ezért időegységre leosztva adják meg (pl. %/nap), de ez csak akkor lehetséges, ha a veszteség időben állandó; amennyiben nem, akkor helyesebb lenne egy önkis-

sülési függvényt használni. Amennyiben a szigorúan vett időfüggő önkisülést és egyéb veszteségeket összegezzük, megkapjuk a teljes időfüggő tárolási veszteséget. Ezt levonva a betárolt energiameennyiségből, az eredmény a kítárolható energia, ami segítségével megkapjuk az immár időfüggő tárolási hatásfokot:

$$\frac{E_{ini} - (E_{sd}(t) + E_{sb}(t))}{E_{ini}} = \eta_s(t) \quad (1)$$

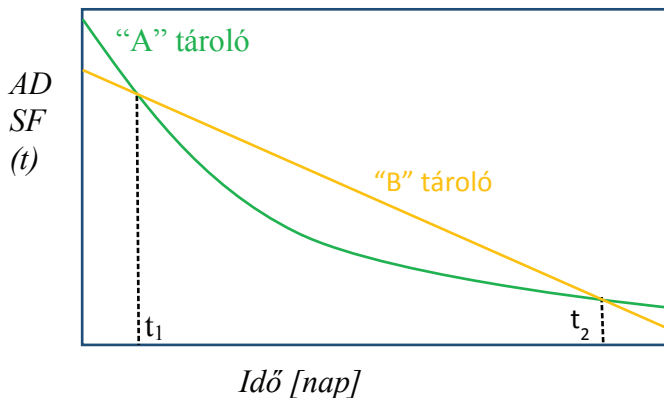
ahol $E_{sd}(t)$ az időfüggő kisülési (sd =self-discharge) függvény, $E_{sb}(t)$ az időfüggő standby veszteség-függvény, E_{ini} az időfüggetlen betárolt energiameennyiség, míg $\eta_s(t)$ az immár időfüggő, minden veszteséget és a visszaalakítási hatásfokot is magába foglaló tárolási hatásfok; ezt nevezzük aktuális kítárolhatósági állapot-függvénynek, vagy ADSF-nek (Actual Discharge State Function).

A visszanyert energiameennyiség így

$$E_{ini} \cdot \eta_s(t) = E_{ini} \cdot ADSF(t) = E_d(t) \quad (2)$$

ahol $E_d(t)$ (d =discharge) már szintén időfüggő.

Amennyiben két tározóban ugyanakkora (egységnyi) energiameennyiséget tárolunk el, az $ADSF(t)$ függvény megadja, hogy ennek mekkora részét tudjuk visszahozni, ha a kisütést t idő múlva kezdjük el és eddig az időpontig a tároló terheletlen állapotban volt. Két tároló $ADSF(t)$ függvényét összehasonlítva könnyen látható, mekkora tárolási időnél melyikből nyerünk vissza több energiát és mekkora tárolási időnél melyiket érdemes használni. Ezt egy sematikus ábrán (2. ábra) is demonstráljuk.



2. ábra. Az időfüggő $ADSF(t)$ függvény segítségével megállapítható, hogy amennyiben a feltöltött tárolók kisütését t_1 időpont előtt kezdjük el, akkor az „A” jelű tároló energetikailag jobb, a kisütést t_1 - t_2 időpontok között elkezdve a „B” jelű jobb, míg a kisütést t_2 időpont után elkezdve ismét az „A” tárolóból tudnánk visszanyerni több villamos energiát

Természetesen az $ADSF(t)$ függvény mellett egyéb vizsgálandó mennyiségek is vannak, mint a

- Telepítési és működési költségek
- Környezeti és társadalmi kritériumok (környezetszennyezés, társadalmi elfogadottság stb.)
- Teljesítménysűrűség
- Energiasűrűség, teljes energiatárolási kapacitás.

Ezek közül itt csak az utóbbi két pontot érintjük, azaz a két vagy több tároló $ADSF$ -függvényének összehasonlításánál jelezzük, ha az egyiknél esetleg extrém nagy tárolási méret kellene ugyanakkora energiameennyiség betárolásához (energiasűrűség), illetve ha fizikai, gazdasági, vagy egyéb okok miatt nem építhető bizonyos

tárolóméretnél nagyobb (pl. a vanádium ritkasága miatt nehéz lenne extra nagy méretű vanádium-redox tárolókat építeni).

Az általunk bemutatott ADSF-függvény valamelyest hasonlít az úgynevezett tárolhatósági- vagy állási időre (shelf-life); ez egy, a gyártók által az akkumulátorokra megadott időfüggetlen, de idő dimenziójú érték, ami arra vonatkozik, hogy a tárolóberendezés terheletlen állapotban tárolva meddig működőképes. Ennek a mennyiségnek is időfüggőnek kellene lennie, hisz előfordulhat, hogy például 6 hónap múlva az akkumulátor tárolókapacitása már csak az eredetinek a 80%-a, míg 12 hónap múlva már csak 60%. Az, hogy meddig jó a tároló, a felhasználástól is függ; bizonyos körülmények között a felhasználónak már a 80% sem éri meg (neki a shelf-life kisebb, mint 6 hónap), máskor a 60% még bőven elég (ekkor a shelf-life 12 hónap feletti). Erre egy jó példa az elektromos autók akkumulátorainak másodlagos felhasználása; egy idő után ezek már az eredeti célokra nem használhatók, de más célokra még megfelelnek. Így valójában az időfüggetlen, de idő dimenziójú shelf-life-nak (tsl) is van egy általánosítható, idő- és megmaradt tárolási kapacitás-függő változata, ahol az utóbbi érték nem feltétlenül változóként, hanem adott határértékként is szerepelhetne (pl. a $t_{sl}^{60}=1$ év; $t_{sl}^{20}=2$ év adatpár azt jelentené, hogy az adott tároló 1 év múlva még az eredeti kapacitásának 60%-ra lenne képes, míg 2 év múlva már csak 20%-ra).

Fontos különbség, hogy míg a shelf-life a terheletlen tárolóberendezésre vonatkozó mennyiség (és ez igaz az időfüggő változatára is), az $ADSF$ -függvény magára a betárolt energiára vonatkozik (szintén terheletlen állapotban); amire természetesen a tárolóberendezés is visszahat.

Visszatérve az $ADSF$ -függvényre, egy konkrét tározó esetén ez állhat több különböző időfüggő és időfüggetlen részből is. Pl. egy szivattyús tározónál maga az „önkisülés” is behoz ilyen tagokat; a párolgási veszteség függ a külső hőmérséklettől és szélétől (ez időfüggő), valamint a tározó aktuális szabad felületétől (ez akár állandó is lehet, de duzzasztott tározóknál általában a tározóban levő mennyiség csökkenésével ez is csökken), míg a szivárgási veszteség a tározóban levő víz mennyiségétől (a vízoszlop magasságától, azaz nyomásától) függ. Ilyen komplex függvényt nehéz modellezni, így az összehasonlításunkban egy egyszerűsített (lineáris) $ADSF$ -függvényt használunk. Ekkor az 1. egyenletben definiált időfüggő tárolási hatásfoknak ($\eta_s(t)$) lesz egy időfüggetlen tagja (η_s), ami mellé egy lineáris időfüggés járul, így az $ADSF$ -függvény az alábbi alakot veszi fel:

$$E_{ini} \cdot \eta_s(t) = E_{ini} \cdot ADSF(t) = E_d(t) \quad (3)$$

alakot veszi fel, ahol – mint korábban is – az η_b a betárolt energiának a villamos energiává visszaalakítását jellemző hatásfok, t pedig az idő. Ilyen esetben a 2. ábra görbéi lineárisra válnának és két tárolóberendezés esetén csak egy metszet lenne, megadva azt az időtartamot, aminél rövidebb tárolásoknál az egyik, hosszabbaknál pedig a másik tározó a jobb. Ebben a formában jól látható, hogyha feltöltés után rögtön elkezdjük a kisütést (pl. ha egy Li-ion akkumulátorral a napsütés egyenetlenségei miatt PV-teljesítményt akarjuk simítani), akkor az $ADSF(t=0)$ értéke a betárolt energiának a villamos energiává visszaalakítását jellemző hatásfokkal egyezik meg, majd innen csökken lineárisan. Így az is jól látható, hogy az adott időhöz tartozó $ADSF$ -értéket kétféleképp növelhetjük; vagy a visszaalakítás hatásfokát növeljük (pl. Power-to-Methane esetben a visszaalakítást végző gázmotor hulladékhőjét egy ORC-berendezésen

hasznosítva [9,10]), vagy a csökkenést lassítjuk, pl. az önkisülés csökkentésével (pl. Power-to-Hydrogen esetben a hidrogén jobb, szivárgásmentesebb tárolásával) vagy a stand-by veszteségeket csökkentjük, mint pl. a folyékony elektródos akkumulátoroknál jobb hőszigetelést alkalmazva a hőveszteség csökkentésével.

A következő részben néhány tárolástípus mutatunk be, majd az egyszerűsített (lineáris) ADSF-függvényüket összehasonlítva kiválasztjuk, hogy hosszabb tárolási időtartamra melyik módszerek teljesítenek jobban a többinél. Ezután a fenti két másodlagos kritérium (energiasűrűség, teljes energiatárolási kapacitás) alapján megmutatjuk, hogy az általunk használt keretrendszerben melyik az az időintervallum, amin belül valószínűleg a Power-to-Methane típusú tárolás lenne a megfelelő.

A tárolási módszerek összehasonlítása

A cikkben pár ismertebb akkumulátor-típust, két Power-to-Gas tárolási típust és egy súlytárolási típust hasonlítottunk össze. A hagyományos szezonális tárolótípust, a szivattyús tárolót itt nem vizsgáljuk; egyrészt ennek a telepítéséhez speciális természeti adottságok kellenek (azaz nem telepíthető bárhova) [2,11], másrészt pedig Magyarországon, történelmi okok miatt [12] a közeljövőben nem várható ilyen fejlesztés.

Mivel a fő cél a Power-to-Methane típusú tárolás elhelyezése a tárolási láncban, ezért a többi típust csak rövidebben ismertetjük.

Akkumulátorok

Az alábbi akkumulátor-típusok ADSF-függvényeivel foglalkozunk:

- Savas ólomakkumulátor
- Nikkel-fémhidrides akkumulátor
- Lítium-ionos (LiNMC/LiFePO₄) akkumulátor
- Vanádium redox flow akkumulátor (lekötött tartállyal, illetve áramoltatva, készenléti állapotban)
- Nátrium-kén akkumulátor

Az első három típusról itt nem szeretnénk sokat írni; mindhárom típus ismert, gyakran használt és mind a magyar, mind az angol szakirodalomban elég sok helyen megtalálhatók a jellemzői [2,3]; a számunkra releváns értékek az 1. táblázatban találhatók.

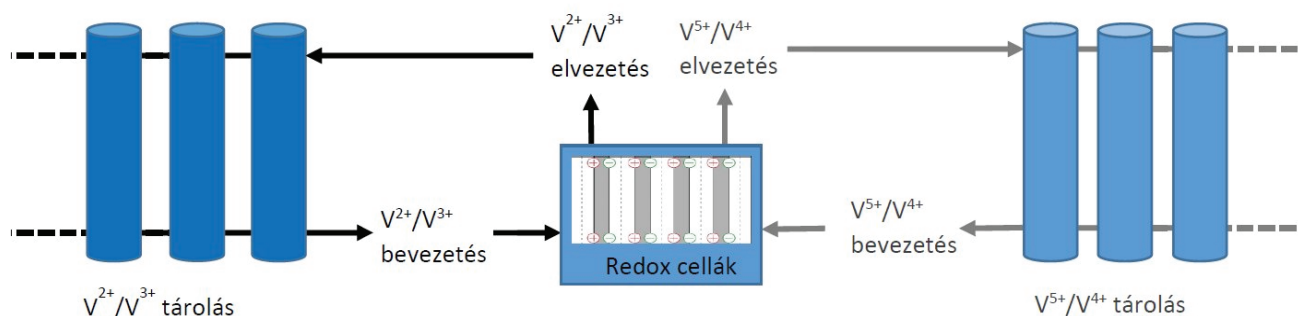
A vanádium-redox áramlási akkumulátornál (VRFB) a kémiai reakció egy membránnal kettéválasztott térben játszódik (ld. a 3. ábrát). Az elektrolitban pár mol/l koncentrációban vanádium-ionokat találhatunk, ezek különböző vegyértékű állapotai között játszódik le az elektrokémiai reakciók (V^{2+}/V^{3+} , illetve V^{5+}/V^{4+}). A kétfajta elektrolitot két külön tartályban tárolják, csak a membránnal elválasztott reakciótérben kerülhetnek egymással kapcsolatban. Gyakorlatilag ez az akkumulátor-típus egy kis kémiai üzem; ha nincs szükség a „végtermékre”, akkor a kétfajta elektrolitot degradáció, szivárgás és párolgás (azaz önkisülés) nélkül tárolják a tartályokban, amelyekből akár több is lehet, sőt, le is választhatók a közpon-

ti, áramtermelő egységről (azaz mintha külön tartályokban levő folyékony üzemanyagok lennének). Ekkor az akkumulátor kikapcsolt állapotban (nem keringetik az elektrolitot) van, önkisülése – amíg a plastik tartályok szét nem mállanak és ez elektrolit el nem folyik – gyakorlatilag nulla. Amennyiben viszont áramoltatják, a napi önkisülés mértéke 20%-ot is elérheti. A visszaalakítás hatásfoka 75-80% közötti, ebben a standby veszteségek is benne vannak (ebben az esetben pl. a szivattyú működése).

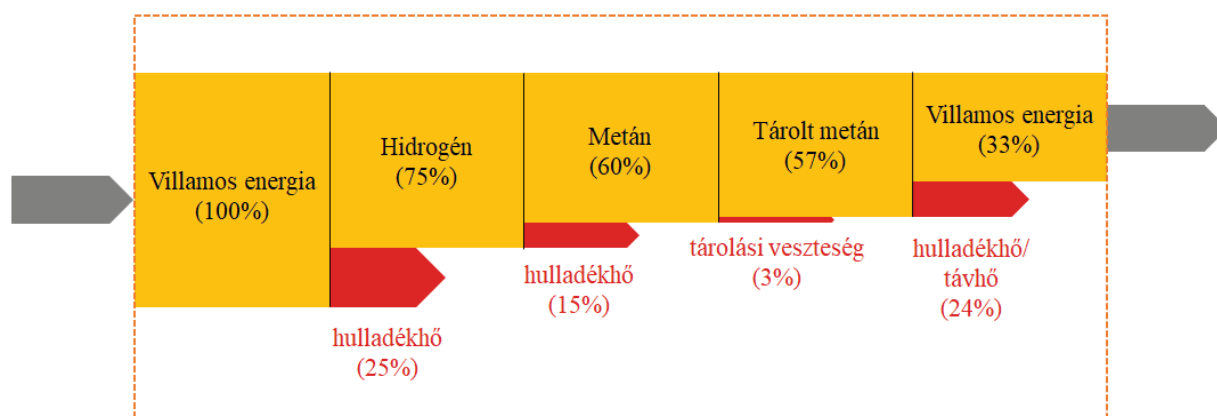
A nátrium-kén (NaS) akkumulátor egy magas hőmérsékletű, olvadékelektrodás akkumulátor; míg a két elektróda (nátrium és kén) folyékony, azaz olvadt állapotban van, az elektrolit szilárd [7,13, 14]. Az elektródok folyékonyan tartása miatt az akkumulátor belső hőmérséklete legalább 300 °C. Az akkumulátor az úgynevezett energia-akkumulátorok közé tartozik; míg a teljesítmény-akkumulátoroknál (mint pl. a Li-ion akkumulátorok is) az energia leadása gyorsan (azaz nagy teljesítménnyel) történik, ennél a típusnál a teljesítmény kisebb, de az össz betárolt energiamennyiség nagy. Kereskedelmi forgalomban konténer-méretben kaphatók; a japán NGK Insulators Ltd. gyártmányai 1,2 MWh tárolására képesek és ezt hat óra (vagy annál hosszabb idő) alatt, max. 200 kW teljesítményen tudják leadni. A magas hőmérsékletet folyamatos feltöltés-kisütési ciklusoknál az önkisülékor keletkező disszipációs hő adja. A teljes átalakítási hatásfok elvileg elérheti a 85%-ot is. Terheletlen állapotban a hőveszteség miatti standby veszteség 3,4 kW, azaz naponta 81 kWh, ami 6,8%. [15]

Power-to-Gas típusú tárolók

A Power-to-Fuel típusú tárolásnál [4] a villamos energia segítségével egy új üzemanyagot állítanak elő, vagy egy létező üzemanyagot alakítanak át magasabb energiatartalmúvá. Mi a módszeren belül két altípussal foglalkozunk, mindkettő a Power-to-Gas csoporthoz tartozik (azaz az előállított üzemanyag gáz halmazállapotú); egyik a hidrogén (Power-to-Hydrogen, P2H), a másik a metán (Power-to-Methane, P2M). A két módszer nagyon összefügg; mindkettő esetében az első lépésben a tárolandó villamosenergia segítségével vízbontással hidrogént állítanak elő. A P2H módszerrel azt a hidrogént használják fel később villamosenergia-előállításra, vagy járműüzemanyagként (de mi csak a villamosenergia-tárolás-villamosenergia jellegű módszereket vizsgáljuk); az újrafelhasználásig pedig nagynyomású gázként vagy kriogenikus folyadékként, vagy kémiai megkötve (pl. ammóniaként) vagy földgázba keverve, gázként tárolják [16,17]. Itt az „önkisülés” a hidrogén elvesztése; ilyen szempontból a nagynyomású gázos tárolást, illetve a kriogenikus folyadékos tárolást vizsgáljuk meg. A P2M módszerrel az így előállított hidrogénből és széndioxidból kémiai [18] vagy biokémiai [19] úton metánt állítanak elő; az így előállított metánból aztán később villamos energiát állítanak elő, vagy járműüzemanyagként használják fel. A jelen cikkben a kisebb energiafelhasz-



3. ábra. A vanádium-redox áramlási akkumulátor elvi vázlata



4. ábra. A Power-to-Methane-to-Power kör lépései, jelölve az átalakulások hatásfokát és a disszipatív veszteségek

nálású, azaz jobb hatásfokú biokémiai változatot vizsgáljuk; ennek az is az előnye, hogy metán-széndioxid keverékek (biogáz, depóniagáz) dúsítására is jó, mert a már meglévő metánt nem alakítja át. A villamos energiává való visszaalakításhoz egy kb. 60%-os metán → villamos energia módszert vizsgálunk, ami a teljes folyamatra kb. 33% tárolási hatásfokot ad (ilyen pl. egy jobb gázturbinna), valamint egy olyan módszert, amikor a hulladékhő metanizáció előtti részét (ez 25+15%, alacsony hőmérsékletű, így várhatóan az össz-hatásfokban max. 0,5-1% növekedést okoz) egy alacsony hőmérsékletű ORC-folyamattal [20] visszaalakítjuk villamos energiává és visszatápláljuk az elektrolizátorba, csökkentve a bemenő energiamennyiséget és így emelve a tárolási hatásfokot, valamint a visszaalakításnál a magas fokú hulladékhőre szintén egy ORC-t illesztve ennek a hőnek jelentős része villamos energiává alakítható, így az össz tárolási hatásfok elérheti az 50%-ot. Mindkét esetben a metán a földgázhálózatban tárolnánk; az önkiszülés így a hálózatról való szivárgás, aminek értékét egyéb adatokból becsültük meg [21]. A folyamat lépései a 4. ábrán láthatók.

Az ADSF-függvények összehasonlítása

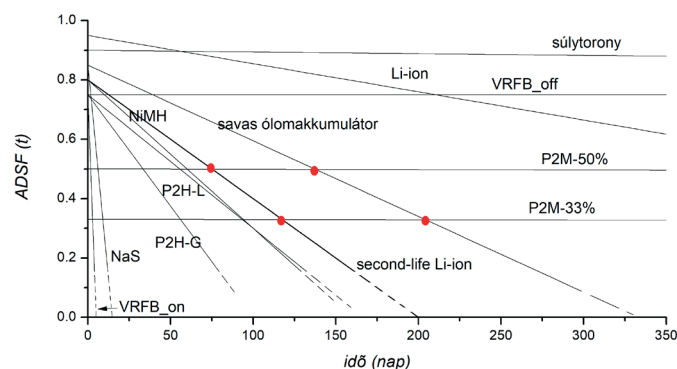
A fenti tárolástípusokra vonatkozó ADSF függvények (3. egyenlet) állandói az 1. táblázatban találhatóak.

1. táblázat. Az egyszerűsített (lineáris) ADSF függvényben szereplő állandók (3. egyenlet). A feltüntetett értékek átlagosak az adott típusra nézve; egyes gyártók termékei ennél jobb, illetve rosszabbak tulajdonságokat is mutathatnak.

Típus	η_b	η_s (naponta)	shelf-life (év)
Savas ólomakkumulátor	0,85	0,003	3-15
Nikkel-fémhidrides akkumulátor	0,80	0,005	5-10
Lítium-ionos (LiNMC/LiFePO ₄) akkumulátor	0,95	0,001	2-3
VRFB (lekötött tartállyal)	0,75	0,2	20-30
VRFB (áramoltatva, készenléti állapotban)	0,75	0	20-30
Nátrium-kén akkumulátor	0,85	0,068	15-25
Power-to-Hydrogen (tisztá gáz formában tárolt hidrogénnel)	0,75	0,01	>50
Power-to-Hydrogen (tisztá folyadék formában tárolt hidrogénnel)	0,75	0,006	>50
Power-to-Methane	0,33-0,5	0,000023	>50
Súlytorony	0,9	0,000064	>1000

Ezek alapján felrajzolható az ADSF(t) vs. idő függvény (5. ábra), ez azt mutatja, hogy a teljesen feltöltött tárolót t idejű terheletlen állapot után kisütve a betáplált villamosenergia hány százalékát kapjuk vissza (szintén villamosenergia-formában). Mint a 2. ábrán is mutattuk, amikor két ilyen függvény metszi egymást, megállapítható, hogy a metszéspontnak megfelelő időnél rövidebb tárolásoknál az egyik, míg a másiknál a másik az energetikailag előnyösebb megoldás. Az 5. ábra alapján bizonyos típusok (súlytároló, kikapcsolt vanádium-redox áramlási akkumulátor) csak energetikai szempontból nézve nagyon előnyösek a hosszú távú energiatárolásban; ezeknek a hátrányaival a következő részben foglalkozunk. Szintén jó megoldásnak tűnik a savas ólomakkumulátor és a Li-ion akkumulátor; ezeknél a nyáron betárolt energia mennyiségének a fele visszanyerhető 3-5 hónap múlva. Egy tároló, ami egy 10 000 fős magyar települést ellát (4260 kWh/fő/év energiaigénnyel számolva) három téli hónapra 10,65 GWh; ekkora méretű tárolót ezekből a típusokból nehéz lenne felépíteni. A Li-ion akkumulátor esetén főképp a szükséges lítium-mennyiség a korlát; ezt a problémát tovább fokozza, hogy a Li-ion akkumulátorok – sok más típussal szemben – jól használhatók a közlekedésben is, így ott is nagy rájuk az igény. Savas ólom akkumulátorok esetén a potenciális környezeti veszélyek lennének talán az elsődlegesek, amiért egy ilyen tárolót nem építenének meg.

Piros pontok jelölik azokat az időket, amikor a P2M tárolási mód jobb lesz ezeknél az akkumulátoroknál. Ez a 33%-os visszanyerésnél (P2M-33%) Li-ion akkumulátorral összehasonlítva kb. 130 nap



5. ábra. A bemutatott tárolási módszerek egyszerűsített (lineáris) ADSF-függvényeinek összehasonlítása. A metszéspontok megadják, hogy a hozzá tartozó időtartamnál rövidebb, illetve hosszabb terheletlen tárolási idők esetén energetikailag melyik tárolási módszer a jobb. A négy piros pont jelzi, hogy melyek azok az idők, amelyeknél hosszabb időtartamú tárolásnál a Power-to-Methane módszer energetikailag jó lehet.

után, míg a savas ólomakkumulátorokkal összehasonlítva kb. 205 nap után történik meg; ezek az értékek 95, illetve 135 napra változnak 50%-os visszanyerés esetén (P2M-50%). Azaz a szezonális energiatárolásnál, amikor a betárolás zömmel július-augusztusban, míg a felhasználás december-februárban, azaz 100-200 nap múlva történne (a villamosenergiát eddig kellene egy terheletlen állapotú tárolóban tárolni), a P2G módszerek már a jelenleg is könnyen megoldható 33%-os visszaalakítás mellett is versenyképesek a legtöbb más tárolási módszerrel szemben a tárgyalt típusok közül a két kivétel a súlytároló és a keringetés nélküli vanádium-redox áramlási akkumulátor. Az ezekkel való összehasonlítás a következő fejezet tárgya.

A többi vizsgált tárolótípus (NaS akkumulátor, cirkuláltatott állapotban levő VRFB akkumulátor, illetve hidrogén tároló, mint folyékony, mind gáz alapú tárolással) ilyen típusú tárolási feladatra nem megfelelő.

A nagykapacitású és hosszú tárolhatósági idejű módszerek összehasonlítása

Az előző számítások alapján a szezonális vagy akár annál hosszabb idejű energiatárolásban a Power-to-Methane módszernek két konkurense maradt, a súlytároló és a lecsatolt tartályos VRFB. Ezek közül a második nem lesz versenyképes; a vanádium még a lítiumnál is nehezebben hozzáférhető, így a már említett városnyi 10 GWh igény esetén a 25 Wh/L energiasűrűség mellett 400 000 m³-nyi, legalább 1 mol/l vanádium-vegyület koncentrációjú oldat előállítás nem tűnik reálisnak.

Komolyabb kihívó a súlytároló. A súlytároló az elvét tekintve a szivattyús tározókhoz hasonlóan potenciális energia formájában tárolja az energiát és azt nagy hatásfokkal lehet visszaalakítani. Bár vannak olyan típusai, amelyek csak bizonyos helyeken telepíthetők (pl. hegyoldalon [22] vagy bányánál [23]), az energiatároló-jellegű változatok [24] szinte bárhova telepíthetők lennének, ahol a talaj megfelelő teherbírásúvá tehető. Az ilyen tározóknál a betárolandó energiával betontömböket helyeznek egymásra egy speciális daru segítségével; kitérésnél a daru leengedi ezeket a kötömböket az alapszintre, miközben egy megfelelő áttét segítségével a benne levő generátor villamos energiát termel. Az ilyen tárolóknál az önkiszülés nehezen értelmezhető, bár hosszú távon a betárolt tömbök lehullása vagy eróziója okozhat ilyen veszteséget. Mivel számszerű adatokat nem találtunk, így kerestünk egy régóta létező, nehéz tömbökből épített, magas építményt és ennél vizsgáltuk meg, hogy kellően hosszú idő alatt mennyivel csökkent a betárolt energia; ebből becsülve meg a napi szintű η_s értéket.

A vizsgált „súlytároló” a Kheopsz-piramis; eredeti magasságát 146,7 m-re becsülik, jelenleg 138,8 m. A jelenlegi tömege kb. 6 millió tonna, térfogata 2,3 millió köbméter, kora kb. 4500 év. Szabályos gúlaként közelítettük mind az eredeti, mind a mostani változatot, valamint az alapok méretét állandónak tekintettük és a veszteséget a tömeg- és a magasságvesztéséből számoltuk. Így a betárolt energia kb. 634 MWh volt, a jelenlegi energiatartalma pedig 567 MWh, ez a teljes élettartamra vetítve 10,5% „önkiszülés”, ami napi szinten $6,4 \cdot 10^{-6}$, azaz 0,00064%/nap, ami gyakorlatilag a P2M módszerekéhez mérhető, viszont a nagy előny a „terheletlen” állapot-beli hosszú élettartam, ami ebben az esetben meghaladja a 1000 évet.

Ennek a típusnak egy komoly fizikai hátránya (ebben a cikkben a pénzügyi oldalt nem vizsgáljuk) az alacsony energiasűrűségből adódó nagy méret. Egy közepes minőségű gázturbinával egy

ilyen súlytárolóban tárolt energia megtermeléséhez kb. 75 tonna metánra (földgázra) lenne szükség. Ez tömegben a súlytárolónk 0,00125 %-a, ami cseppfolyós formában tárolva tárolásban (LNG) kb. 170 m³, nagynyomású tárolásban (CNG, 200-250 bar) kb. 420 m³, míg normál nyomáson kb. 100000 m³. Azaz egy Kheopsz-piramis méretű atmoszférikus nyomású tározó P2M tározóként kb. 23-szor akkora tárolási kapacitású lenne, mint súlytározóként, nagyobb nyomáson ez még inkább eltolódna; ráadásul nem kellene évente bontani-építeni a piramist.

Mindezen nagyobb energiamennyiségek szezonális tárolására a technikailag legjobb, bárhova telepíthető megoldásnak a Power-to-Methane technológia tűnik. Fontos megjegyezni, hogy gazdasági-társadalmi szempontból is elfogadható módszerről van szó, amely jól illeszkedik a már meglevő tárolási és villamosenergia-termelési infrastruktúrához is [25,26].

Összefoglalás

A jelenleg használt, nagy energiamennyiségek eltárolására képes energiatárolási módszerek közül a legtöbbet az időjárásfüggés miatt ingadozó energiatermelés és a szintén ingadozó igények közti különbség kiegyenlítésére használják. Ezekhez a legfeljebb pár napos hosszúságú tárolási feladatokhoz akár nagyobb mennyiségek (pl. pár MWh) esetén is megfelelnek az akkumulátoros rendszerek. Szezonális és ennél is hosszabb, éves-több éves tárolásnál viszont ezek a típusok nem megfelelőek. A cikkben bevezettünk egy részben élettartam, részben hatásfok jellegű mennyiséget, amely azt mutatja meg, hogy a feltöltött és terheletlen tárolóban álló energiát t idő múlva mekkora részben tudjuk visszanyerni. Ez a mennyiség kissé hasonlít az akkumulátorok shelf-life mennyiségű jellemzőjére, de nem azt mutatja meg, hogy a tárolóberendezés meddig használható, hanem azt, hogy a benne eltárolt energiát – bizonyos visszanyerési hatásfokkal meddig tudjuk felhasználni.

A következő módszereket hasonlítottuk össze: savas ólomakkumulátor; nikkelfémhidrides akkumulátor, lítium-ionos (LiNCM/LiFePO₄) akkumulátor, vanádium redox áramlási akkumulátor (készletli állapotban, illetve leválasztott tárolótartállyal), nátrium-kén akkumulátor, Power-to-Hydrogen módszer (tisztá gáz formában tárolt hidrogénnel, ill. tisztá folyadék formában tárolt hidrogénnel), Power-to-Methane módszer (33, illetve 50% visszanyerési hatásfokkal), valamint a súlytornyos tárolást. Szezonális energiatárolásnál a P2M módszer a leválasztott tartályos VRFB és a súlytároló kivételével az összes más módszernél nagyobb hatásfokkal tudja visszaadni a betárolt energiát. Más, szintén technikai jellegű kritériumokat (mint pl. a méret, illetve az alapanyag fellelhetősége) is figyelembe véve a P2M technológia a maradék két módszernél is jobb, ezért a szezonális (nyáron megtermelem, pár hónapig gázhálózatba tárolom, majd télen visszaalakítom villamosenergiává), illetve ennél hosszabb (pl. pár éves) tárolási időknél fontos szerepe lehet. Ezek alapján a P2M módszert szezonális vagy több éves, nagy energiamennyiségű, viszonylag kis helyigényű (kompakt), nagyon könnyen és elfogadható hatásfokkal „kisüthető” tározóként pozícionálható.

A cikkben a P2M módszer helyét mutattuk be a többi, ismeretebb energiatárolási módszer között; természetesen az általunk használt technikai kritériumok mellett a gazdasági, környezetvédelmi, illetve jogi oldalt is figyelembe kell venni, amikor tényleges tárolók telepítését fontolgatjuk. Mindenesetre fontos megjegyezni, hogy jelenleg Magyarországon több éves fejlesztés után [27,28]

két fél-ipari méretű P2M projekt is folyik [29]. Mivel a hazai hálózat metán- (azaz földgáz-) tárolási kapacitása nagyon nagy, ezért – a megfelelő jogi és gazdasági feltételek megteremtése esetén – remélhetőleg hamarosan megindulhat az ipari méretű P2M tárolás is.

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.

Hivatkozásjegyzék

- [1] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/944 irányelve (2019.június 5.) a villamos energia belső piacára vonatkozó közös szabályokról és a 2012/27/EU irányelv módosításáról, 2. cikk, 59. pont, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/hu/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>, hozzáférve: 2020.02.02.
- [2] Gerse Károly: *Energiatárolók, Energiatárolók, Akadémiai Kiadó*, ISBN: 978 963 454 493 7, DOI: 10.1556/9789634544937, 2020 (<https://mersz.hu/kiadvany/707/>).
- [3] Robert A. Huggins: *Energy Storage - Fundamentals, Materials and Applications*, Second Edition, Springer, Cham, ISBN 978-3-319-21238-8, DOI 10.1007/978-3-319-21239-5, 2016.
- [4] *Handbook of Energy Storage - Demand, Technologies, Integration* (szerk.: Michael Sterner és Ingo Stadler), Springer, ISBN 978-3-662-55503-3, DOI 10.1007/978-3-662-55504-0, 2019.
- [5] Györke Gábor, Groniewsky Axel, Imre Attila : Egykomponensű munkaközegek újszerű osztályozása ORC technológiához, *Energiagazdálkodás*, 60/1-2 (2019) 34-45.
- [6] Albert Hiesl, Amela Ajanovic, Reinhard Haas: On current and future economics of electricity storage, *GHG Greenhouse Gases Science and Technology*, 10 (2020) 1176–1192; DOI: 10.1002/ghg.2030
- [7] Tomio Tamakoshi: Development of Sodium Sulfur Battery and Application, *Grand Renewable Energy Proceedings*, March 07, 2019, p286, DOI: 10.24752/gre.1.0_286
- [8] Farahani, S. (2008). Battery Life Analysis in: *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, 207–224. doi:10.1016/b978-0-7506-8393-7.00006-6
- [9] Alberto Benato and Alarico Macor: Biogas Engine Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle, *Energies* 10 (2017) 327; <https://doi.org/10.3390/en10030327>
- [10] Macchi, E.; Astolfi, M. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*; Elsevier-Woodhead Publishing: Duxford, UK, 2016
- [11] A.G. Ter-Gazarian: *Energy Storage for Power Systems (IET POWER AND ENERGY SERIES 63)*, 2nd. Edition, The Institution of Engineering and Technology, 2011
- [12] Owen McIntyre: Gabčíkovo – Nagymaros Project: A Test Case for International Water Law?, In: Anton Earle, Anders Jager-skog and Joakim Öjendal (editors): *Transboundary Water Management: Principles and Practice*, Stockholm International Water Institute, 2010, page 228
- [13] Taku Oshima, Masaharu Kajita and Akiyasu Okuno: Development of Sodium-Sulfur Batteries, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 1 [3] 269-76 (2004)
- [14] Zsiborács Henrik, Imre Attila, Hegedűsné Dr. Baranyai Nóra, Vincze András, Pintér Gábor: Hatékonysági jellemzők a napel-emes rendszerekhez alkalmazott akkumulátorok területén, *Energiagazdálkodás*, 61/4 (2020) pp37-41.
- [15] EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission & Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834. (online: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/ESHB%201001834%20reduced%20size.pdf>)
- [16] Kubus Péter: Hidrogén energiatárolás P2G2P Energiagazdálkodás, 61/4 (2020) pp20-24.
- [17] Kovac, Ankica; Paranos, Matej; Marcius, Doria: Hydrogen in energy transition: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) 10016-10035, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.256
- [18] Roensch, Stefan; Schneider, Jens; Matthischke, Steffi; Schluter, Michael; Goetz, Manuel; Lefebvre, Jonathan; Prabhakaran, Praseeth; Bajohr, Siegfried: Review on methanation - From fundamentals to current projects, *Fuel*, 166 (2016) 276-296, DOI: 10.1016/j.fuel.2015.10.111
- [19] D. Hidalgo, J.M. Martín-Marroquín: Power-to-methane, coupling CO2 capture with fuel production: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 132 (2020) 110057
- [20] D. Vera, A. Baccioli, F. Jurado and U. Desideri: Modeling and optimization of an ocean thermal energy conversion system for remote islands electrification, *Renewable Energy*, 162 (2020) 1399-1414
- [21] KSK – Nemzetgazdasági ágak és háztartások metán (CH4) kibocsátása (1985–)(4/4) (online: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ua028d.html) (2017)
- [22] Francesca Cava, James Kelly, William Peitzke, Matt Brown, Steve Sullivan: Advanced Rail Energy Storage: Green Energy Storage for Green Energy, in: *Storing Energy - With Special Reference to Renewable Energy Sources* (Ed.: Trevor M. Letcher), (2016), pp69-86, Chapter 4, Elsevier
- [23] Gravitricity – Gravity Energy Storage (online: <https://gravitricity.com/>) (2016)
- [24] Samuel K. Moore: The Ups and Downs of Gravity Energy Storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage, *IEEE Spectrum* 58 (2021) 38 – 39, DOI: 10.1109/MSPEC.2021.9311456
- [25] Zoltán Csedő, Botond Sinóros-Szabó, Máté Zavarkó: Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology, *Energies* 13 (2020) 4973; <https://doi.org/10.3390/en13184973>
- [26] Gábor Pintér: The Potential Role of Power-to-Gas Technology Connected to Photovoltaic Power Plants in the Visegrad Countries—A Case Study, *Energies* 13 (2020) 6408; <https://doi.org/10.3390/en13236408>
- [27] Sinóros-Szabó Botond: Egy power-to-gas prototípus üzemeltetési tapasztalatai: K+F+I eredmények és lehetőségek, *Energiagazdálkodás (különszám)* 60 (2019) 3-8
- [28] Csedő Zoltán: A power-to-gas technológiafejlesztés tapasztalatai Magyarországon, *Energiagazdálkodás* 61 (2020) 16-20
- [29] NKFIH: Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív technológia által gázenergiává (hidrogén, biometán) történő alakítását célzó fejlesztések megvalósítása (2020-3.1.2-ZFR-KVG), támogatott projektek (2020) (online: <https://nkfi.gov.hu/palyazoknak/egyeb-tamogataszfr-kvg>)

A Power-to-Gas/Power-to-Methane technológia magyarországi helyzete 2020-ban

Dr. Csedő Zoltán

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

Dr. Imre Attila

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

A 2. Magyar Power-to-Gas konferenciára 2020. november 17-én került sor az MTA „Magyar Tudomány Ünnepe” rendezvénytársaságában. Mint oly sok más esemény, a pandémia miatt a konferencia is az online térbe kényszerült, az MTA Webex rendszerén keresztül lett megtartva, majd az előadások az MTA Youtube csatornájára kerültek fel (https://www.youtube.com/watch?v=_8D2H2-8oNI).

Az előző, 2019-es I. Magyar Power-to-Gas Konferencia arra volt hivatott, hogy bizonyítsa, a power-to-gas technológia újszerűsége ellenére van Magyarországon egy megfelelő power-to-gas innovációs ökoszisztéma, melyre alapozva nemzetközileg is kimagasló innovációs eredményeket felmutatni képes power-to-gas projektek is megvalósíthatók. A konferencia sikeres volt, az előadások alapján megírt cikkek az Energiagazdálkodás egy különszámában jelentek meg (https://matarka.hu/cikk_list.php?fusz=170581&nyelv=eng). Talán még ennél is nagyobb siker, hogy összeállt egy olyan szakértői csapat, amely a laboratóriumi és ipari méretek közti ugráshoz szükséges kutatásokat és fejlesztéseket el tudja végezni.

A II. Magyar Power-to-Gas Konferencia – mint ahogy az alcím is mutatja – már nemcsak a kutatás-fejlesztésről és innovációról szólt, hanem arra fókuszált, hogy a P2G technológiának milyen szerepe lehet Magyarországon; ilyen szerepek pl. a szezonális energiatárolás, vagy a földgázexport-függés csökkentése. Éppen ezért az előadók között nemcsak kutatókat, hanem ipari szereplőket, illetve szabályozást végző szervezetek képviselőit is találhatunk. Az előadások a konferencia honlapjáról tölthetők le (https://www.energia.mta.hu/~pressure/2hp2g/p2g_main_1.htm); az előadások alapján írt cikkek, illetve néhány, szintén a témához kötődő cikk pedig ebben a kiadványban olvasható.

A II. Magyar Power-to-Gas Konferencián érintett témák a hazai P2G innovációs ökoszisztéma gyors fejlődését is jól jelzik. Míg az I. Magyar Power-to-Gas Konferencián nagyobb hangsúly volt az operatív kutatás-fejlesztési lehetőségeken, a technológia működőképességének demonstrálásán, a hasonló nemzetközi fejlesztéseken, a technológiai know-how fejlesztés fontosságán vagy – tágabban értelmezve – a power-to-gas technológiafejlesztés és az energiatárolás hazai lehetőségein, addig ezekre a tapasztalatokra építve, a II. Magyar Power-to-Gas Konferencia minden tekintetben az ipari méretű alkalmazáshoz közelebbi szempontokkal foglalkozott. A magas szintű energiapolitikai és a szabályozói aspektusok, a nemzetközi vállalati tapasztalatok, az energetikai értékláncokban és az energiatárolási kontextusban történő elhelyezés, vagy a konkrét fejlesztési és implementációs lehetőségek vizsgálata arról tanúskodik, hogy a hazai P2G innovációs ökoszisztémában rendelkezésre áll az az egyedülálló kompetencia- és tudásbázis, amely a P2G ipari szintű alkalmazáshoz és egy nemzetközi szín-

ten is élenjáró P2G modell kidolgozásához és megvalósításához szükséges.

Bár a konferenciák fontos mérföldkövek egy kutatási irányban, de ha ez az irány csak elméleti kutatásokra épül vagy csak további elméleti kutatásokat indukál, akkor önmagukban nem vezetnek sehova. Szerencsére ebben az esetben nem ez a helyzet; hosszú előkészítő munka után az NKFIH 2020 elején kiírta az NKFIH a power-to-gas technológia magyarországi meghonosítását támogató „Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív technológia által gázenergiává (hidrogén, biometán) történő alakítását célzó fejlesztések megvalósítása (2020-3.1.2-ZFR-KVG), támogatott projektek” pályázatát. A nyertesek között szerepel két Power-to-Methane technológiát használó konzorcium is, az egyik a BIOGÁZ UNIO Zrt. – BAKONY BIO Zrt. – Szegedi Biológia Kutatóközpont összetételű, a másik pedig a Délzalai Víz- és Csatornamű Zrt. – Pannon Egyetem – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem összetételű konzorcium. Mindkét projekt a biogáz széndioxid-tartalmának metanizálását tűzte ki célul, környezetbarát, alacsony hőmérsékletű és nyomású biológiai metanizációval. Mivel hazánkban a biogáz-termelés már így is eléggé elterjedt, illetve a fejlett mezőgazdaságnak és állattenyésztésnek köszönhetően van megfelelő minőségű és mennyiségű alapanyag a további növekedéshez, a biogáz „nemesítés” (azaz a biogáz metanizálással való dúsítása földgáz-minőségűvé) fontos szerepet játszhat a földgázimport csökkentésében.

A P2G technológia magyarországi 2020-as helyzetét összegezve, a hazai adottságok és fejlesztési tervek tehát – nagy örömkökre – egyaránt kedvezőek a P2G technológiában rejlő innovációs potenciál kiaknázásához, és ezzel a magyar energiaszektor fenntarthatóbbá válásához. Nem szabad azonban elfeledkeznünk arról, hogy a P2G jelentős innovációtartalma miatt még igen komplex kérdéseket kell megválaszolnunk, amelyhez továbbra is szükség lesz az innovációs ökoszisztémában részt vevők közötti tudásmegosztásra, és az erőforrások olyan kombinálására, hogy abból a magyar energiaszektor és az egész magyar társadalom profitáljon. Mindehhez azt is érdemes figyelembe vennünk, hogy a klíma- és természetvédelem globális feladat, ezért érdemes építenünk a külföldi tapasztalatokra és trendekre is, amellett, hogy erőfeszítéseinket a nemzetközi szinten is versenyképes, hazai P2G kutatás-fejlesztési és innovációs tevékenységekre koncentráljuk.

Terveink szerint a következő konferenciával (ami a pandémiától függően 2021-ben vagy 2022-ben lesz) már nemzetközi szintre lépünk. Emellett a most induló két metanizációs projekt is olyan fázisba ér, amikor már látszik, mennyire életképesek. Reméljük, hogy legközelebb már ezekről az eredményekről is be tudunk számolni!

Résztvevők	Projekt
Magyar Földgáztároló Zrt.	Akvamarin Projekt – Hidrogén energiatárolási innováció a Magyar Földgáztároló Zrt.-nél
VPP SOLAR Fejlesztő, Építő és üzemeltető Kft.	Karbonmentes Innovatív Hidrogén Megoldás Kereskedelmi Léptékű Piaci Fejlesztése Projekt
Bükkábrányi Fotovoltaikus Erőmű Projekt Kft. Szegedi Tudományegyetem	A bükkábrányi naperőmű megújuló áramtermelését hasznosító innovatív energiatároló technológia fejlesztése
Délzalai Víz- és Csatornamű Zrt. Pannon Egyetem Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem	Power-to-Gas – Szezonális energiatárolásra alkalmas metanizáló berendezés fejlesztése
BIOGÁZ UNIO Zrt. BAKONY BIO Zrt. Szegedi Biológia Kutatóközpont	Cirkuláris bioenergia termelés a biogáz és P2G technológiák összekapcsolásával

Az NKFIH 2020-as, a Power-to-Gas technológia magyarországi meghonosítását támogató „Karbonmentes, többlet villamos energia innovatív technológia által gázenergiává (hidrogén, biometán) történő alakítását célzó fejlesztések megvalósítása (2020-3.1.2-ZFR-KVG), támogatott projektek” pályázatának győztes projektjei; dőlt betűvel a Power-to-Hydrogen, normál betűvel a Power-to-Methane típusúak (forrás: <https://nkfi.gov.hu/palyazoknak/egyeb-tamogatás/zfr-kvg>)



Energiatudományi
Kutatóközpont

