

NEGATÍV SZÉN-DIOXID-EMISSION?

NEGATIVE CARBON DIOXIDE EMISSION?!

Nemestóthy Nándor¹, Bakonyi Péter², Béla Finé Bakó Katalin^{3,*}

¹egyetemi docens

²tudományos főmunkatárs

³egyetemi tanár

bako@almos.uni-pannon.hu

Pannon Egyetem Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport, Veszprém

ÖSSZEFOGLALÁS

Az üvegházhatású gázok, köztük a CO₂ kibocsátási rátájának csökkentése mellett napjainkban az ellentett folyamat: a CO₂ kivonása is egyre nagyobb érdeklődést kelt. Ezekről az ún. negatív emissziós technológiákról kívántunk összegzést nyújtani elsősorban műszaki, mérnöki szempontból, valamint a hozzájuk kapcsolódó hazai kutatás-fejlesztési törekvésekről.

ABSTRACT

Reducing the *emission rate* of greenhouse gases, e.g. CO₂ has received much attention recently, but the reverse process: *negative CO₂ emission* is today in the focus of several international research and development projects. In this paper the aim was to introduce these negative emission technologies mainly from engineering, technical aspects. Moreover, we aimed to present the endeavour of the joining Hungarian researches.

Kulcsszavak: üvegházhatás, CO₂-kivonás, CO₂-befogás, CO₂-eltárolás

Keywords: greenhouse effect, sequestration, CO₂ capture, CO₂ storage

BEVEZETÉS

Az emberiség a fosszilis CO₂ atmoszférába történő kibocsátását kb. háromszáz évvel ezelőtt kezdte meg, akkor még az intenzifikált mezőgazdaság révén. Később az ipar kialakulása ehhez jócskán hozzájárult. Ezen antropogén tevékenységek következtében az atmoszférában a CO₂ koncentrációja 120 ppm-mel nőtt, ami klímánk megváltozását okozza (URL1).

* levelező szerző

Válaszlépésként nemzetközi akciókat szerveztek, hogy az üvegházhatású gázok emisszióját csökkentsük, s a globális felmelegedést 2 °C-ra korlátozzuk. Az erre irányuló legtöbb technológia célja, hogy *csökkentse* azt a mértéket, rátát, amellyel a fosszilis eredetű szénat kivesszük a tárolókból, ökoszisztemekből, felhasználjuk, illetve a belőle képződő CO₂-ot kibocsátjuk az atmoszférába. Ide tartoznak a megújuló energiaforrások, a hatékonyabb energiafelhasználású technológiák, a fosszilis energiával működő erőműveknél a szén-dioxid leválasztása és tárolása. A szén-dioxid-emisszió csökkentéséről nemrégiben jelent meg két elemzés a *Magyar Tudományban* (Koppány, 2021; Koppány–Hanula, 2021).

Környezettudatos gondolkodásmódunk azonban nem korlátozódhat csupán erre. Az ellentétével, a fordítottjával is el kell kezdenünk foglalkozni: azon eljárásokkal, amelyek képesek CO₂-ot *kivonni* az atmoszférából, és visszajuttatni a geológiai tárolókba, szárazföldi ökoszisztemekbe. Ezek az ún. negatív emissziós technológiák (NET) sokkal kevesebb figyelmet kaptak ez idáig, mint a hagyományos, a klímaváltozást enyhíteni kívánó procedúrák (URL1).

Természetesen ezek a negatív emissziós technikák rövid távon nem lesznek elegendők a CO₂ légköri koncentrációjának jelentős csökkentésére (Kramer, 2020), emellett a „hagyományos” eljárásokat is tovább kell javítani és fejleszteni, hogy közelíthessük a zéróemissziós célt. De azt is meg kell érteni, hogy kizárólag az emisszió csökkentésére irányuló erőfeszítések önmagukban nem elégségesek.

Ebben az összeállításban főként a negatív emissziós eljárások műszaki, mérnöki oldalát igyekszünk bemutatni.

A negatív emissziós technológiákat az alábbi módon csoportosíthatjuk:

1. biológiai metódusok felhasználása a talaj, erdők és vizes élőhelyek, mocsaras területek szénkészségének növelésére;
2. geológiai technikák fejlesztése, amelyek képesek CO₂-ot leválasztani a légkörből, és megkötni a kőzetekben;
3. energia termelése biomasszával, miközben a képződő CO₂-ot visszanyerjük és tároljuk;
4. kémiai eljárások alkalmazása a CO₂ leválasztására közvetlenül a légkörből és elhelyezésére geológiai tárolókban.

BIOLÓGIAI METÓDUSOK

Technikai szempontból két részre bonthatók ezek az eljárások:

- Tengeri, óceáni partvidékek használata, hasznosítása során olyan eljárások, módszerek bevezetése, fejlesztése és elterjesztése, amelyek növelik a széntárolási kapacitást élő növényekben és az üledékekben, például: mangrove-erdők, árapálymozgás által érintett mocsaras területek, tengerifűágyak, sós vízzel telített tengerpartok stb.

- Szárazföldi technológiák, olyan földhasználati gyakorlatok, amelyek nagy hangsúlyt fektetnek az erdősítésre, az erdők újratelepítésére, az erdőgazdálkodási menedzsment újragondolására, illetve a mezőgazdasági eljárások olyan megváltoztatására, amely növeli a talaj széntárolási képességét.

Meg kell itt említenünk az ún. „mesterséges fákat”, amelyek henger alakú építmények (Kramer, 2020), s a szél erejét kihasználva juttatják a CO_2 -tartalmú levegőt a „levelekhez”. Ezek ioncserélő gyantát tartalmaznak, és száraz állapotban könnyedén megkötik a CO_2 -ot. Amikor telítődtek, nedves környezetbe juttatják őket, ahol a gáz kiszabadul, és koncentrált állapotban kinyerhető. E különleges fák „közeli rokonai” az ún. „szuperfák”, amelyek napenergiával, esővízgyűjtő rendszerrel, algaövesztéssel stb. kombinálva (Magasmarti–Bélafiné Bakó, 2020) képesek a CO_2 -megkötés mellett további funkciókat is ellátni: például a városi levegő tisztítását, energiatermelést stb.

GEOLÓGIAI TECHNIKÁK

Szintén két eljárás különböztethető meg:

- Karbon mineralizáció, ahol a légkörben levő CO_2 reaktív ásványi anyagokkal kémiai kötést képes kialakítani, s így például a kőzetek felületén (nyomás nélkül), vagy akár a felszín alatt (nyomást alkalmazva) koncentrált CO_2 -áram injektálható bazaltba vagy hasonló kőzetekbe, ahol a pórusokban lejátszódik a mineralizáció.
- Geológiai megkötés, ahol a leválasztott CO_2 -ot megfelelő kőzetek, geológiai formációk belsejébe injektálják, ahol a pórusokban hosszú időn keresztül ott marad, a kőzet nem engedi ki a gázt.

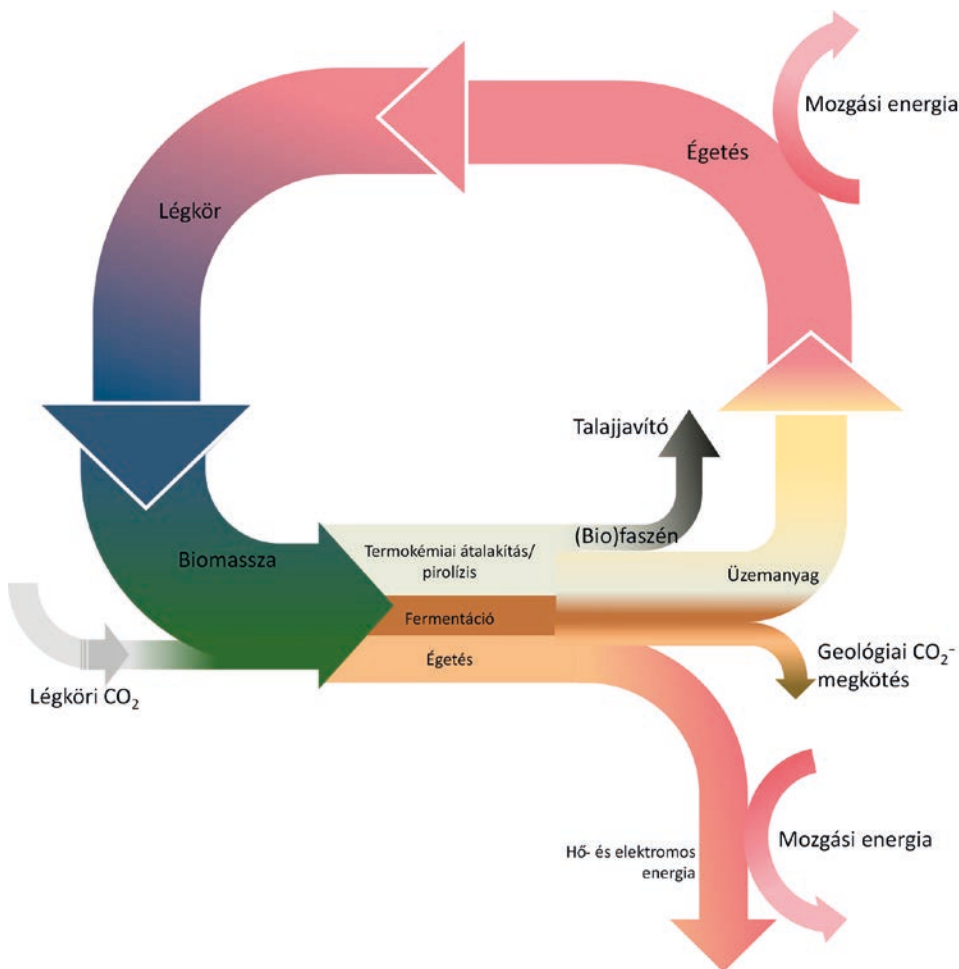
A szén-dioxid felszín alatti elhelyezéséről már 2011-ben megjelentek tanulmányok magyar szerzők tollából (Király et al., 2011), akik szerint Magyarországot földtani adottságai alkalmassá teszik a CO_2 tárolására, mivel a Pannon-medencében (üledékes medence) nagy kiterjedésű sós vizes rezervoárok találhatók. Konkrétan a Jászsági-medence régiójában terepi vizsgálatokat is végeztek, hogy feltárják a tárolóréteg viselkedését.

BIOMASSZA-ALAPÚ ENERGIATERMELÉS

A növények fejlődésük során CO_2 -ot kötnek meg a légkörből, és a belőlük származó biomassza energetikai célú felhasználásával ezt a CO_2 -ot bocsátják ki, amely így kevesebb emissziót jelent, mint ami a fosszilis energiaforrásoknál tapasztal-

ható. A keletkező CO_2 leválasztásával és tárolásával talán a leghatékonyabb negatív emissziós technológia alakítható ki.

A biomassza energiává alakítása és a keletkező CO_2 megkötése többféle eljárás szerint valósítható meg. Az egyik legegyszerűbbnél a biomasszát elégetik, abból hő- és elektromos energiát nyernek, s a képződő CO_2 -ot leválasztják, majd geológiai szerkezetekben tárolják (1. ábra).



1. ábra. Biomassza-alapú energiatermelés
(a szerzők munkája)

Egy másik technológiánál a biomasszát – fajtájától függően (lignocellulóz, olajtartalmú növények, cukor-, illetve keményítőtartalmúak, szennyvizek és hulladékok, alga) – először egy termokémiai eljárással átalakítják folyékony vagy gázne-

mű anyaggá (járművek üzemanyaga), s ezt követően használják (főként mozgási) energia előállítására (*1. ábra*). Bár így a képződő CO_2 -ot nehéz megkötni, egyes biomassza-konverziós technikák során lehetőség nyílik szénben gazdag ún. bio-faszén gyártására is – ez a pirolízis vagy hidropirolízis –, ami elégethető, gázosítható vagy akár talajjavítóként közvetlenül is eltárolható.

Végül a biomasszából fermentációs úton is nyerhető üzemanyag (például anaerob biogáz fejlesztésével, hidrogén- és alkohol-előállítással, olajtermelő algákkal stb.), amelynek elégetésével juthatunk energiához.

Említésre méltó még az az egyre fontosabb útvonal is, amelyet az elektromos gépjárművek jelentenek, s ahol az égetéssel nyert elektromos áram szintén üzemanyagként fogható fel, és így mozgási energiát nyerhetünk vele.

E biomassza-alapú energiatermelő technológiáknál a CO_2 leválasztása két módon valósulhat meg: a biomassza égetésénél, illetve fermentációjánál a keletkezés helyén vagy a biomassza olyan konverziójánál, ahol biofaszén keletkezik melléktermékként. Az égetésnél alkalmazható eljárásokat már a fosszilis (például szén) energiahordozókkal működő erőműveknél kialakították és alkalmazzák, ezek kiforrott technikák, könnyen átvehetők a biomasszáknál is. Ezen eljárások fő célja, hogy viszonylag tiszta CO_2 -áramot lehessen végül elérni.

A fermentációknál keletkező CO_2 kinyerésére pedig az egyik legjobb példa az etanol-előállításnál jelentkezik, ahol viszonylag tiszta (élelmiszer-minőségűnek tartott) CO_2 képződik, ami technikailag kinyerhető, de nem igazán gazdaságos. Kutatás-fejlesztési projektekből sok helyütt azt javasolják, hogy a kinyert CO_2 -ot helyben használják fel valamilyen további eljárásnál (Nghiem–Senske, 2015). Ugyanakkor demonstrációs céllal az Archer Daniels Midland (USA) kukoricafeldolgozó vállalatnál (Kramer, 2020) a kinyert CO_2 -ot 2100 m mélyen egy homokkő formációba injektálják, s így valódi NET-eljárást valósítanak meg.

A karbonnegatív biomassza-üzemanyag konverzió biofaszén előállítással kombinálva igen ígéretes lehetőség. A technikáknál – mint új cél – most már a lehető legnagyobb mértékű szénkivonásra kellene törekedni, s ezt szem előtt tartva lehet optimalizálni az eljárást: használható üzemanyagot állítani elő, illetve olyan faszenet, amely hosszú távon is hozzájárul a talaj javításához. Ezzel egyébként – ráadásul – még a mezőgazdaságból származó biomasszahozamot is növelni lehet.

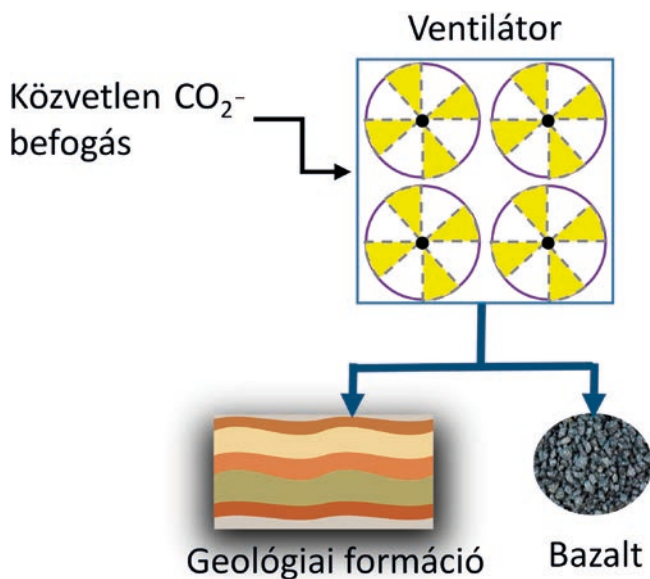
KÉMIAI ELJÁRÁSOK

A CO_2 közvetlenül a légkörből történő leválasztása (Direct Air Capture, DAC) az egyik legfontosabb NET-lehetőség, viszonylag nagy figyelmet kapott a közelmúltban mint újszerű, *high-tech* eljárás (Keith et al., 2018). Kétségtelenül nagy előnye, hogy könnyen telepíthető, rugalmas technika, oda helyezhető, ahol a CO_2

tárolása is megoldható (nem szükséges csővezeték), továbbá igen nagy tisztaságú CO_2 nyerhető általa, ami akár kereskedelmi forgalomba is hozható.

A DAC-rendszerek működésük során első lépésként hatalmas ventilátorok segítségével óriási mennyiségű levegőt kényszerítenek át a kontaktorokon, ahol a CO_2 -molekulákat kémiai anyagok adszorbeálják (2. ábra). Amint telítődnek ezek az anyagok, felmelegítik őket (második lépés), s így a megkötődött CO_2 távozik a rendszerből. Ez azt jelenti, hogy a DAC-rendszerek rendkívül energiaigényesek, mind a ventilátorok mozgatása, mind a deszorpció megvalósítása (hőenergia) tetemes energiabefektetést igényel.

A DAC-eljárás elődjének tekinthető az erőművekből kibocsátott gázokból történő CO_2 -kinyerés, amit már a biomassza-alapú energiatermelésénél is említettünk. A CO_2 koncentrációja például szénerőműveknél 15% körüli. A CO_2 leválasztása és kompressziója ezeknél a technológiáknál igen energiaigényes, megközelítőleg az erőmű által termelt energia 16%-a (!) szükséges hozzá (Kramer, 2018). Ily módon ez a technika csak akkor életképes, ha a CO_2 kinyerésére támogatást nyújt a kormány.



2. ábra. A CO_2 leválasztása a légkörből (DAC-eljárás)
(a szerzők munkája)

A légköri CO_2 koncentrációja a füstgázokénál mintegy háromszázszor (!) kisebb, más szóval hígabb a rendszer, így a szeparáció mint művelet extrém nehézségekkel küzd. Technikailag megvalósítható eljárás, de rendkívül költséges, és kicsi a hatékonysága.

A CO₂-molekulákat folyékony (abszorpció) vagy szilárd (adszorpció) halmazállapotú anyagok tudják megkötni. Folyadék lehet például valamilyen oldószer, amelyben könnyen oldódik a CO₂, de a megkötést hatékonyabbá lehet tenni úgy is, hogy a CO₂-ot – a fizikai oldódással párhuzamosan – kémiai reakcióba viszzük. A legegyszerűbb ilyen megoldást a hidroxidok vagy aminok nyújtják. Ezeket akár szilárd anyagok felületére is fel lehet vinni mint funkció csoportot. Így még kicsiny koncentrációjú CO₂ is megköthető ezen anyagokkal történő érintkezés (kontakt) révén.

A CO₂-ot megkötő anyagok kiválasztásánál nemcsak a megkötőképesség fontos, hanem az is, hogy könnyen, kis energiabefektetéssel kiűzhető legyen belőlük a telítődést követően. Energetikailag a megkötődés – kémiai anyagokat felhasználva – általában spontán végbemegy, de a kiűzéshez (deszorpció – melegítéssel), illetve a CO₂ koncentrálásához (kompresszió) mindenképpen energia szükséges.

Hozzá kell még fűznünk, hogy a DAC-technika csak akkor sorolható a NET-eljárások közé, ha az összegyűjtött CO₂-ot vagy rögtön eltároljuk, vagy olyan terméket állítunk elő vele, amely hosszabb távon „megőrzi” ezt a gáznemű anyagot. A rövid élettartamú termékeknél a CO₂ igen hamar visszakerülhet a légkörbe, így ezt a fajta felhasználást kerülni kellene.

ESETTANULMÁNYOK – DAC

A New York-i székhelyű Global Thermostat céget Peter Eisenberger, a kanadai Columbia Egyetem tanára alapította (Kramer, 2018) DAC-rendszerek tervezésére, építésére, működtetésére. A 2010 óta működő 1000 t/év kapacitású DAC-üzemben a 2 m² felületű aminos kontaktorokat telítődés után elszállítják a szekunder lépcsőhöz, ahol vákuum alatt 85 °C-on történik a deszorpció. Az energiát főként a közelben hozzáférhető hulladékhő biztosítja, így költséghatékonyabb a működtetés.

A Climeworks zürichi (Svájc) cég DAC-üzeme az első, amely üzemanyagot állít elő a kinyert CO₂-ból. Az Audi céggel közösen évi 50 t CO₂-ból gyártanak szintetikus üzemanyagot kutatási-fejlesztési és demonstrációs célokra. A Climeworks-rendszerben a kontaktorokat nem mozgatják, hanem – a telítődést követően – a ventilátorokat egyszerűen leállítják, és geotermikus hőenergiát (is) használva felmelegítik az aminos oldatot 100 °C-ra a deszorpcióhoz. A cég Izlandon működtet egy üzemet Carbfix néven, ahol – egy EU által finanszírozott projekt keretében – a koncentrált CO₂-ot a helyi bazalt anyagú geológiai formációkba injektálják (mineralizáció).

A kanadai Carbon Engineering cég (URL2) kálium-hidroxidot (KOH) használ a CO₂ megkötésére, s ezt kémiai átalakulások után nyeri ki végül gáz formájában.

A legutóbbi időszakban megfigyelhető trend szerint a NET-céllal létrehozott cégek szoros együttműködést alakítanak ki nagy olajtársaságokkal. A Global Thermostat például az ExxonMobil céggel lép frigyre, s együtt dolgoznak DAC-rend-

szerek kialakításán, működtetésén (Kramer, 2020). Az első látásra talán meglepő társulás mögött természetesen komoly érdekek húzódnak: az olajkitermelő cégek a nagynyomású CO_2 -ot olyan kőolajtárolókból való olaj kitermelésére használják, amelyek másképpen nem hozzáférhetők. Ez az ún. EOR (Enhanced Oil Recovery) vagy harmadlagos kinyerési technológia. Ráadásul a CO_2 az olajba beoldódva csökkenti annak viszkozitását, ami elősegíti a hozamok növelését.

A CO_2 tárolásának egy másik, konkrét módszere, amikor építőanyagokba épül be a CO_2 . A Solidia Technologies cég (New Jersey, USA) olyan cement- és beton-előállítási eljárást dolgozott ki, amelynél a karbonlábnyom 60%-kal kisebb, mint a hagyományos módszeré. A technológiában víz helyett szén-dioxiddal kezelik a cementet, s kalcium-karbonát képződik, ami (a szilikátokkal együtt) a beton szilárdságát javítja.

HAZAI HELYZET

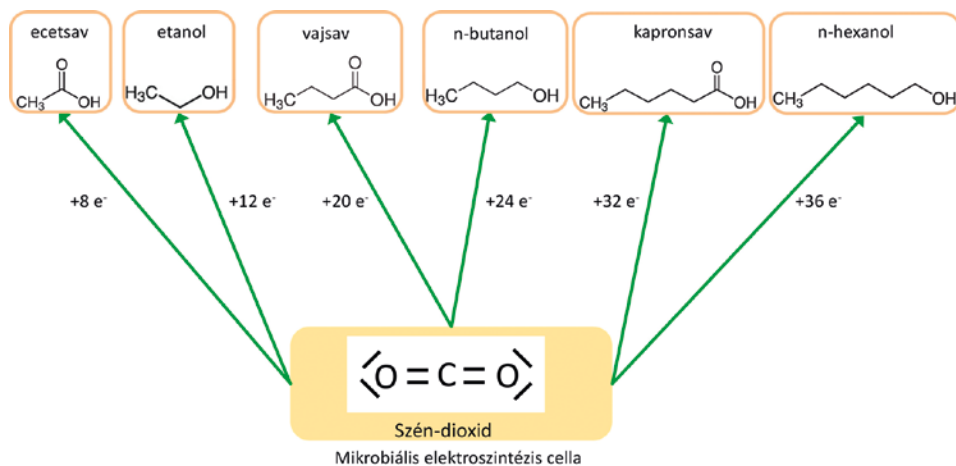
Bár Magyarországon – tudomásunk szerint – még nem indult el a NET-hez kapcsolódó kezdeményezés, a részfolyamatokat tekintve több helyen is bele tudnánk folyni a kutatás-fejlesztési projektekbe. A gázelegyekből történő CO_2 -kinyerésnél például a hagyományos elnyeletési technikákon túl környezetbarát membránszeparációs eljárások is alkalmazhatók. A membrános gázszeparációt a veszprémi Pannon Egyetemen régóta tanulmányozzuk, felhasználási lehetőségeiről beszámoltunk: alkalmas lehet a képződő biogáz (Szentgyörgyi et al., 2010), vagy akár inerttartalmú földgáz (Törő et al., 2011) CO_2 -tartalmának eliminálására. Ezek a tapasztalatok igen hasznosak lehetnek például a biomassza égetésénél keletkező füstgázokból történő CO_2 szeparációjánál.

A biohidrogén fermentációja során keletkező CO_2 -ot is tartalmazó gázelegyszeparációja is megvalósítható membránok segítségével (Bakonyi et al., 2013; Nemestóthy et al., 2020), ami a biomassza-fermentációval kapcsolatos folyamatoknál használható *know-how*-t jelenti.

A CO_2 leválasztását és redukcióját a Szegedi Tudományegyetemen is aktívan kutatják nanoszerkezetű katalizátorok (Endrődi et al., 2017), fotokatalitikus (Hursán et al., 2016), elektrokatalitikus (Roy et al., 2018), illetve termokatalitikus (Bali et al., 2021) eljárások segítségével.

A gázfázisból történő CO_2 -kinyerésnél sokszor az a cél, hogy vizes fázisba juttassuk a CO_2 -ot. Ez kémiai elnyeletésnél közvetlenül megvalósítható, viszont adalékanyagok szükségesek hozzá. Van azonban egy lehetőség, amely adalékok nélkül is meggyorsíthatja a folyamatot: a szénsav-anhidráz enzim. Ez a biokatalizátor az élő szervezetekben a vízben oldott CO_2 szénsavvá alakulását, illetve annak visszaalakulását segíti elő (Bednár et al., 2013; Bednár et al., 2016).

A kinyert CO_2 más, hasznos vegyületekké történő átalakítását ún. bioelektrokémiai rendszerek segítségével is meg lehet oldani környezetbarát úton. Ezek olyan berendezések, ahol elektrokémiaileg aktív (ún. exoelektrogén) mikrobák metabolizmusa révén a kémiai energia-elektromos energia konverzió tud megvalósulni (Koók–Bélafiné Bakó, 2019). A legismertebb ilyen rendszer a mikrobiális üzemanyagcella. Ezek kifejlesztését követően megjelentek további, speciális cellák, az egyik a mikrobiális elektroszintézis cella (Jourdin–Burdyny, 2021), amely például szén-dioxidból képes előállítani 2, 4 vagy akár 6 szénatomos platform vegyületeket (3. ábra). E cellákban a megfelelően megválasztott mikrobák a CO_2 redukciója révén képesek különféle komponenseket (főként alkoholok és savak) gyártani.



3. ábra. CO_2 -ot felhasználó, mikrobiális elektroszintézis cellában megvalósítható reakciók (a szerzők munkája)

A kinyert CO_2 hasznosítását annyira fontosnak véli a nemzetközi kutatói társadalom és a döntéshozók, hogy életre hívták a *Journal of CO_2 Utilization* című szaklapot, amelyben nemrégiben kutatócsoportunknak is jelent meg publikációja (Bakonyi et al., 2020).

ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkkal az volt a célunk, hogy rávilágítsunk: a CO_2 -kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések egyedül nem lesznek képesek megállítani a légkörben a CO_2 -szint emelkedését, ehhez kivonási technológiákra is szükség van. Ezekről az ún. negatív emissziós technológiákról kívántunk összegzést nyújtani, valamint a hozzájuk kapcsolódó hazai kutatási-fejlesztési törekvésekről.

A cikkben bemutatott kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az „Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium létrehozása” című, NKFIH-872 számú projekt és a „Körforgásos gazdasági alapokon nyugvó fenntarthatósági kompetencia központ létrehozása a Pannon Egyetemen” című, 2019-1.3.1-KK-2019-00015 számú projekt keretében valósult meg.

IRODALOM

- Bakonyi P. – Nemestóthy N. – Bélafi-Bakó K. (2013): Biohydrogen Purification by Membranes: An Overview on the Operational Conditions Affecting the Performance of Non-Porous, Polymeric and Ionic Liquid Based Gas Separation Membranes. *Int J Hydrogen Energy*, 38, 9673–9687. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.158, http://real.mtak.hu/15794/7/jav_HE_11937_corr.pdf
- Bakonyi P. – Peter J. – Koter S. et al. (2020): Possibilities for the Biologically-assisted Utilization of CO₂-rich Gaseous Waste Streams Generated during Membrane Technological Separation of Biohydrogen. *Journal of CO₂ Utilization*, 36, 231–243. DOI: 10.1016/j.jcou.2019.11.008, <https://www.semanticscholar.org/paper/Possibilities-for-the-biologically-assisted-of-of-Bakonyi-Peter/3bcc0ddb7faef069ff55cfec4fa80df1b2e68583>
- Bali, H. – Mutyala, S. – Efremova, A. et al. (2021): Role of Active Metals Cu, Co, and Ni on Ceria towards CO₂ Thermo-catalytic Hydrogenation. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 133, 699–711. DOI: 10.1007/s11144-021-02007-7, http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/22122/7/32107428_preprint.pdf
- Bednár A. – Bélafiné Bakó K. (2013): A szénsavanhidráz enzim alkalmazása támasztórteges ionos folyadék membránokban. „A szén-dioxid arcai” tudományos ülés, 2013. május 8., MTA Székház, Budapest
- Bednár A. – Nemestóthy N. – Bakonyi P. et al. (2016): Enzymatically-boosted Ionic Liquid Gas Separation Membranes Using Carbonic Anhydrase of Biomass Origin. *Chemical Engineering Journal*, 303, 621–626. DOI: 10.1016/j.cej.2016.05.148, <http://real.mtak.hu/106165/>
- Endrődi B. – Bencsik G. – Darvas F. et al. (2017): Continuous-flow Electroreduction of Carbon Dioxide. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 133–154. DOI: 10.1016/j.peccs.2017.05.005, <http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/12448/1/1-s2.0-S0360128517300333-main.pdf>
- Hursán D. – Kormányos A. – Rajeshwar, K. et al. (2016): Polyaniline Films Photoelectrochemically Reduce CO₂ to Alcohols. *Chemical Communications*, 57, 8858–8861. DOI: 10.1039/C6CC04050K, <http://www.rsc.org/suppdata/c6/cc/c6cc04050k/c6cc04050k1.pdf>
- Jourdin, L. – Burdyny, T. (2021): Microbial Electrosynthesis: Where Do We Go from Here? *Trends in Biotechnology*, 39, 4, DOI: 10.1016/j.tibtech.2020.10.014, [https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799\(20\)30291-2](https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799(20)30291-2)
- Keith, D. K. – Holmes, G. – St. Angelo, D. et al. (2018): A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, DOI: 10.1016/j.joule.2018.05.006, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118302253>
- Király Cs. – Berta M. – Falus Gy. (2011): A szén-dioxid felszín alatti elhelyezése. CCS – új eszköz a klímaváltozás elleni küzdelemben, *Természet Világa*, 142, 1, 27–28.
- Koók L. – Bélafiné Bakó K. (2019): A mikrobiális elektrokémiai rendszerek legújabb perspektívái – az elektrontól az iparig. *Magyar Kémikusok Lapja*, 74, 53–55. DOI: 10.24364/MKL.2019.02, http://epa.uz.ua/03000/03005/00035/pdf/EPA03005_MKL_2019_02_053-056.pdf

- Koppány K. (2021): A Pareto-hatékony klímavédelem és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentési lehetőségeinek határa. *Magyar Tudomány*, 182, 3, 322–331. DOI: 10.1556/2065.182.2021.3.4, https://mersz.hu/hivatkozas/matud202103_f55977#matud202103_f55977
- Koppány K. – Hanula B. (2021): Mennyi szén-dioxid van egy euróban? A sikeres emissziócsökkentéshez globális gondolkodás, elemzés és tervezés szükséges. *Magyar Tudomány*, 182, 3, 307–321. DOI: 10.1556/2065.182.2021.3.3, https://mersz.hu/hivatkozas/matud202103_f55352#matud202103_f55352
- Kramer, D. (2018): Can Carbon Capture from Air Shift the Climate Change Equation? *Physics Today*, 71, 9, 26–29. DOI: 10.1063/PT.3.4018, <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.3.4018>
- Kramer, D. (2020): Negative Carbon Dioxide Emissions. *Physics Today*, 73, 1, 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.4389
- Magasmarti K. L. – Bélafiné Bakó K. (2020): „Szuperfák” a környezet védelméért. *Membrántechnika és Ipari Biotechnológia*, 11, 1, 5–7.
- Nemestóthy N. – Bélafi-Bakó K. – Bakonyi P. (2020): Enhancement of Dark Fermentative H₂ Production by Gas Separation Membranes: A Review. *Bioresource Technology*, 302. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122828, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420300973>
- Nghiem, N. P. – Senske, G. E. (2015): Capture of Carbon Dioxide from Ethanol Fermentation by Liquid Absorption for Use in Biological Production of Succinic Acid. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175, 4, 2104–2113. DOI: 10.1007/s12010-014-1369-1, <https://bit.ly/3559gyx>
- Roy, A. – Hursán D. – Artyushkova, K. et al. (2018): Nanostructured Metal-N-C Electrocatalysts for CO₂ Reduction and Hydrogen Evolution Reactions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 32, 512–520. DOI: 10.1016/j.apcatb.2018.03.093, <https://bit.ly/3D6snVt>
- Szentgyörgyi E. – Nemestóthy N. – Bélafi-Bakó K. (2010): Application of Membranes in Biogas Production. *Desalination and Water Treatment*, 14, 112–115. DOI: 10.5004/dwt.2010.2582
- Törő M. – Vágó Á. – Bélafi-Bakó K. et al. (2011): Application Assessment of Membrane-based Gas Separation Technology. *MOL Scientific Magazine*, 2, 50–57. https://mol.hu/images/pdf/A_MOL_rol/Mediaszoba/MOL_Group_Szakmai_Tudomanyos_Kozlemenyek/SZTK_2011_2_vegso_kicsi.pdf
- URL1: *Negative Emission Technologies and Reliable Sequestration. A Research Agenda*. Washington: The National Academies Press, 2019 DOI: 10.17226/25259, <https://www.nap.edu/search/?term=Negative+Emission+Technologies+and+Reliable+Sequestration.>
- URL2: *Carbon Engineering*. Canada. <https://carbonengineering.com/our-technology/>