

# NEGATÍV SZÉN-DIOXID-EMISSZIÓ?!

## NEGATIVE CARBON DIOXIDE EMISSION?!

Nemestóthy Nándor<sup>1</sup>, Bakonyi Péter<sup>2</sup>, Bélafiné Bakó Katalin<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>egyetemi docens

<sup>2</sup>tudományos főmunkatárs

<sup>3</sup>egyetemi tanár

bako@almos.uni-pannon.hu

Pannon Egyetem Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutatócsoport, Veszprém

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az üvegházhatású gázok, köztük a CO<sub>2</sub> kibocsátási rátájának csökkentése mellett napjainkban az ellentett folyamat: a CO<sub>2</sub> kivonása is egyre nagyobb érdeklődést kelt. Ezekről az ún. negatív emissziós technológiákról kívántunk összegzést nyújtani elsősorban műszaki, mérnöki szövegből, valamint a hozzájuk kapcsolódó hazai kutatás-fejlesztési törekvésekről.

### ABSTRACT

Reducing the *emission rate* of greenhouse gases, e.g. CO<sub>2</sub> has received much attention recently, but the reverse process: *negative CO<sub>2</sub> 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, CO<sub>2</sub>-kivonás, CO<sub>2</sub>-befogás, CO<sub>2</sub>-eltárolás

**Keywords:** greenhouse effect, sequestration, CO<sub>2</sub> capture, CO<sub>2</sub> storage

### BEVEZETÉS

Az emberiség a fosszilis CO<sub>2</sub> atmoszférába történő kibocsátását kb. háromszáz évvel ezelőtt kezdte meg, akkor még az intenzifikált mezőgazdaság révén. Később az ipar kialakulása ehhez jócskán hozzá tett. Ezen antropogén tevékenységek következtében az atmoszférában a CO<sub>2</sub> koncentrációja 120 ppm-mel nőtt, ami klímánk megváltozását okozza (URL1).

\* levelező szerző

Válaszlépként nemzetközi akciókat szerveztek, hogy az üvegházhatású gázok emisszióját csökkentjük, 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 szénkészletének növelésére;
2. geológiai technikák fejlesztése, amelyek képesek CO<sub>2</sub>-ot leválasztani a légkörből, és megkötni a kőzetekben;
3. energia termelése biomasszával, miközben a képződő CO<sub>2</sub>-ot visszanyerjük és tároljuk;
4. kémiai eljárások alkalmazása a CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-tartalmú levegőt a „levelekhez”. Ezek ioncserélő gyantát tartalmaznak, és száraz állapotban könnyedén megkötik a CO<sub>2</sub>-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, alganövesztéssel stb. kombinálva (Magasmarti–Bélafiné Bakó, 2020) képesek a CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> reaktív ásványi anyagokkal kémiai kötést képes kialakítani, s így például a kőzetek felületén (nyomás nélkül), vagy akár a felszín alatt (nyomást alkalmazva) koncentrált CO<sub>2</sub>-áram injektálható bazaltba vagy hasonló kőzetekbe, ahol a pórusokban lejátszódik a mineralizáció.
- Geológiai megkötés, ahol a leválasztott CO<sub>2</sub>-ot megfelelő kőzetek, geológiai formációk belsejébe injektálják, ahol a pórusokban hosszú időn keresztül ott marad, a kőzet nem engedi ki a gázt.

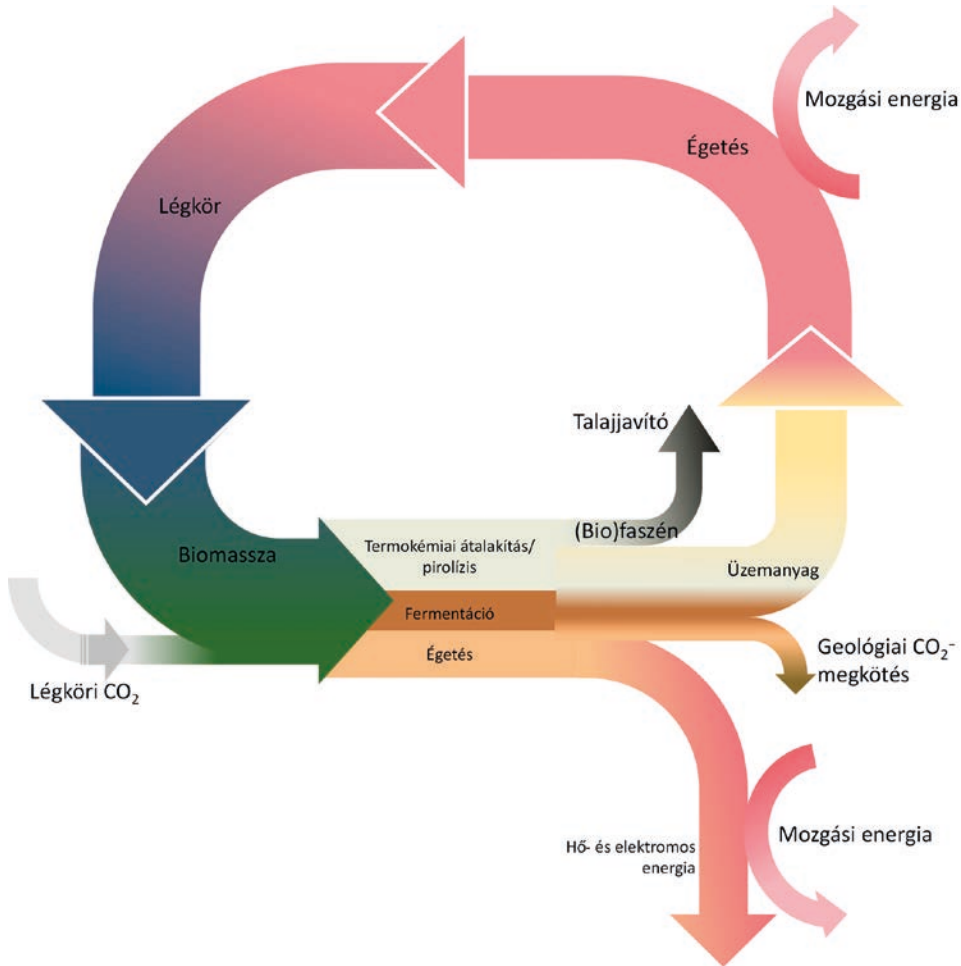
A szén-dioxid felszín alatti elhelyezéséről már 2011-ben megjelentek tanulmányok magyar szerzők tollából (Király et al., 2011), akik szerint Magyarországot földtani adottságai alkalmassá teszik a CO<sub>2</sub> tárolására, mivel a Pannon-medencében (üledékes medence) nagy kiterjedésű sós vizes rezervoárok találhatók. Konkrétan a Jászsági-medence régiójában terepi vizsgálatokat is végeztek, hogy feltárják a tárolóréteg viselkedését.

### BIOMASSZA-ALAPÚ ENERGIATERMELÉS

A növények fejlődésük során CO<sub>2</sub>-ot kötnek meg a légkörből, és a belőlük származó biomassza energetikai célú felhasználásával ezt a CO<sub>2</sub>-ot bocsátják ki, amely így kevesebb emissziót jelent, mint ami a fosszilis energiaforrásoknál tapasztal-

ható. A keletkező CO<sub>2</sub> leválasztásával és tárolásával talán a leghatékonyabb negatív emissziós technológia alakítható ki.

A biomassza energiává alakítása és a keletkező CO<sub>2</sub> megkötése többféle eljárás szerint valósítható meg. Az egyik legegyszerűbbnél a biomasszát elégetik, abból hő- és elektromos energiát nyernek, s a képződő CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-ot nehéz megkötni, egyes biomassza-konverziós technikák során lehetőség nyílik szénben gazdag ún. biofaszén 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.), amelyek elégetésével juthatunk energiához.

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

E biomassza-alapú energiatermelő technológiáknál a CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-áramot lehessen végül elérni.

A fermentációknál keletkező CO<sub>2</sub> kinyerésére pedig az egyik legjobb példa az etanol-előállításnál jelentkezik, ahol viszonylag tiszta (élelmiszer-minőségűnek tartott) CO<sub>2</sub> képződik, ami technikailag kinyerhető, de nem igazán gazdaságos. Kutatás-fejlesztési projekteknél sok helyütt azt javasolják, hogy a kinyert CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-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.

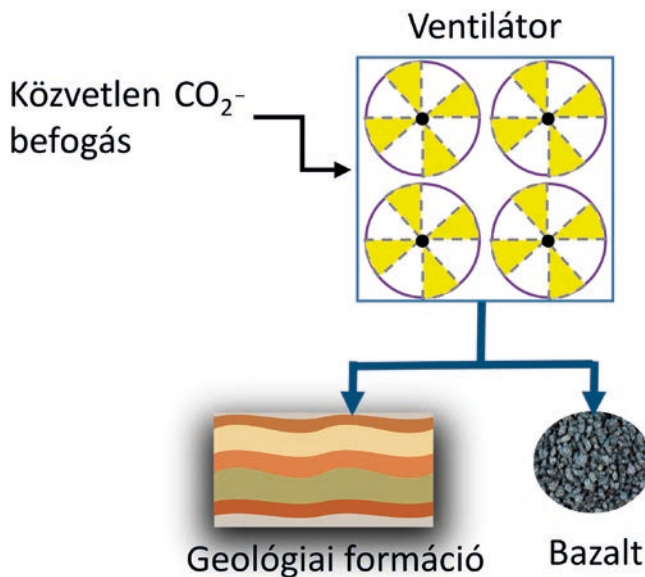
## KÉMIAI ELJÁRÁSOK

A CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>

tárolása is megoldható (nem szükséges csővezeték), továbbá igen nagy tisztaságú CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-molekulákat kémiai anyagok adszorbeálják (2. ábra). Amint telítődnek ezek az anyagok, felmelegítik őket (második lépés), s így a megkötődött CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-kinyerés, amit már a biomassza-alapú energiatermelésénél is említettünk. A CO<sub>2</sub> koncentrációja például szénerőműveknél 15% körüli. A CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> kinyerésére támogatást nyújt a kormány.



2. ábra. A CO<sub>2</sub> leválasztása a légkörből (DAC-eljárás)  
(a szerzők munkája)

A légköri CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-molekulákat folyékony (abszorpció) vagy szilárd (adszorpció) halmazállapotú anyagok tudják megkötni. Folyadék lehet például valamilyen oldószer, amelyben könnyen oldódik a CO<sub>2</sub>, de a megkötést hatékonyabbá lehet tenni úgy is, hogy a CO<sub>2</sub>-ot – a fizikai oldódással párhuzamosan – kémiai reakcióba visszük. A legegyszerűbb ilyen megoldást a hidroxidok vagy aminok nyújtják. Ezeket akár szilárd anyagok felületére is fel lehet vinni mint funkciós csoportot. Így még kicsiny koncentrációjú CO<sub>2</sub> is megköthető ezen anyagokkal történő érintkezés (kontakt) révén.

A CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> koncentrálásához (kompresszió) mindenképpen energia szükséges.

Hozzá kell még fűznünk, hogy a DAC-technika csak akkor sorolható a NET-eljárások közé, ha az összegyűjtött CO<sub>2</sub>-ot vagy rögtön eltároljuk, vagy olyan terméket állítunk elő vele, amely hosszabb távon „megőrzi” ezt a gáznemű anyagot. A rövid élettartamú termékeknél a CO<sub>2</sub> igen hamar visszakerülhet a légkörbe, így ezt a fajta felhasználást kerülni kellene.

#### ESETANULMÁNYOK – 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 m<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub>-ból. Az Audi céggel közösen évi 50 t CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-ot a helyi bazalt anyagú geológiai formációkba injektálják (mineralizáció).

A kanadai Carbon Engineering cég (URL2) kálium-hidroxidot (KOH) használ a CO<sub>2</sub> 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 frigré, 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<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> az olajba beoldódva csökkenti annak viszkozitását, ami elősegíti a hozamok növelését.

A CO<sub>2</sub> tárolásának egy másik, konkrét módszere, amikor építőanyagokba épül be a CO<sub>2</sub>. 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 szilikáttal együtt) a beton szilárdságát javítja.

### HAZAI HELYZET

Bár Magyarországon – tudásunk 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<sub>2</sub>-kinyerésnél például a hagyományos elnyelési technikákon túl környezetbarát membránszeparációs eljárások is alkalmazhatók. A membrános gázszeperációt 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<sub>2</sub>-tartalmának eliminálására. Ezek a tapasztalatok igen hasznosak lehetnek például a biomassa égetésénél keletkező füstgázokból történő CO<sub>2</sub> szeparációjánál.

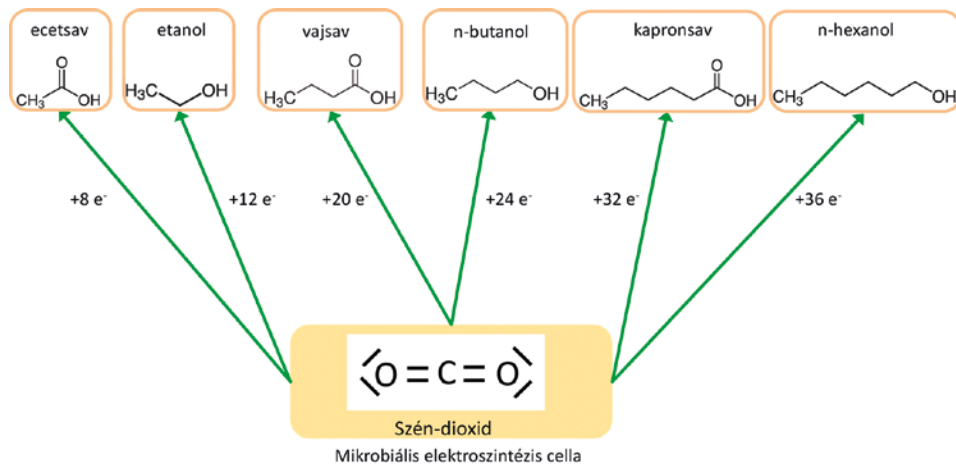
A biohidrogén fermentációja során keletkező CO<sub>2</sub>-ot is tartalmazó gázelegyszeparációja is megvalósítható membránok segítségével (Bakonyi et al., 2013; Nemestóthy et al., 2020), ami a biomassa-fermentációval kapcsolatos folyamatoknál használható *know-how*-t jelenti.

A CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-kinyerésnél sokszor az a cél, hogy vizes fázisba juttassuk a CO<sub>2</sub>-ot. Ez kémiai elnyelésnél 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<sub>2</sub> szénsavvá alakulását, illetve annak visszaalakulását segíti elő (Bednár et al., 2013; Bednár et al., 2016).



A kinyert  $\text{CO}_2$  más, hasznos vegyületekké történő átalakítását ún. bioelektrokémiai rendszerek segítségével is meg lehet oldani környezetbarát úton. Ezek olyan berendezések, ahol elektrokémiailag 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 vegyületet (3. ábra). E cellákban a megfelelően megválasztott mikrobák a  $\text{CO}_2$  redukciója révén képesek különféle komponenseket (főként alkoholok és savak) gyártani.



3. ábra.  $\text{CO}_2$ -ot felhasználó, mikrobiális elektroszintézis cellában megvalósítható reakciók (a szerzők munkája)

A kinyert  $\text{CO}_2$  hasznosítását annyira fontosnak véli a nemzetközi kutatói társadalom és a döntéshozók, hogy életre hívták a *Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization* című szaklapot, amelyben nemrégiben kutatócsoportunknak is jelent meg publikációja (Bakonyi et al., 2020).

## ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkkal az volt a célunk, hogy rávilágítsunk: a  $\text{CO}_2$ -kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések egyedül nem lesznek képesek megállítani a légkörben a  $\text{CO}_2$ -szint emelkedését, ehhez kivonási technológiákra is szükség van. Ezekről az ún. negatív emissziós technológiákról kívántunk összeggést 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](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 CO<sub>2</sub>-rich Gaseous Waste Streams Generated during Membrane Technological Separation of Biohydrogen. *Journal of CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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](http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/22122/7/32107428_preprint.pdf)
- Bednár A. – Bélafiné Bakó K. (2013): A szénsavanhidráz enzim alkalmazása támasztóréteges 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.pecs.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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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](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](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](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 H<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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](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/>