

Hulladékból energia

Baktériumok az emberiség szolgálatában

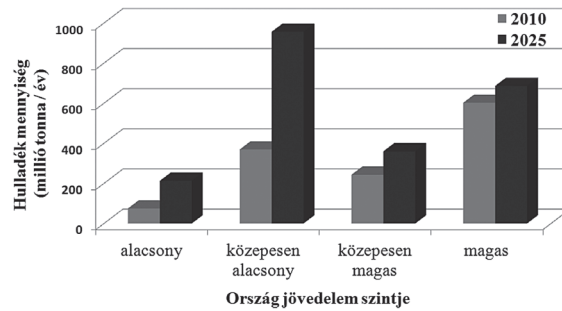
RÓZSEBERSZKI TAMÁS

Az első élő létformák megjelenésétől rögs út vezetett az emberi civilizáció kialakulásáig. Ez a bámulatos, egyre gyorsuló fejlődés azonban veszélyeket is hordoz. Az emberiségnek az utóbbi évtizedekben sikerült rádöbbennie önpusztító tevékenységére. Ennek ellenére még ma is a legfőbb globális kihívások közé tartozik többek között a fokozódó energiaigény környezetkímélő fedezése, illetve a keletkező jelentős mennyiségű hulladék csökkentése és kezelése. A jelenlegi, egyre inkább urbanizálódó világunkban nehezen elképzelhető (akár már rövid időre is) az elektromos áram vagy a hulladékgazdálkodás mellőzése. Az 1. ábra szakemberek becslése alapján szemlélteti, hogyan alakul át a világ keletkező városi hulladék mennyisége a különféle országokban. Az elmúlt években és napjainkban az egy főre jutó hulladék mennyisége a magas jövedelmű országok nagyvárosaiban (Németország, Svédország, Magyarország) akár többszöröse is lehet az alacsony jövedelmű országok lakosaihoz viszonyítva. A fejlődő országok esetén viszont a népesség robbanásszerű növekedése következtében a keletkező hulladékmennyiség ugrásszerűen emelkedni fog 2025-re. Összességében elmondható, hogy az energiafogyasztás és a hulladékkezelés problémaköre nehezedik. A legnagyobb változás azonban az alacsony (Szerbia, Ghána) és a közepesen alacsony jövedelmű országok (India, Törökország) nagyvárosait fogja érinteni. [1]

Magyarországon a hulladék gyűjtése nagyrészt megoldott, de a hulladékfeldolgozási hierarchia területén elmaradunk az Európai Unió átlagához képest. Ez többek között annak köszönhető, hogy a szelektív hulladékgyűjtési program az elvárásokhoz mérten alul teljesített. Ezek alapján a szelektív hulladékgyűjtés hatékonyságának növelése és a beérkező hulladék megfelelő kezelése (kevesebb lerakásra kerülő hulladék) javíthatja az ország hulladékgazdálkodási szintjét. [2, 3]

Hulladékkezelési technikák

Az évmilliók során rengeteg faj eltűnt, de vannak olyanok is, melyek már igen hosszú ideje a Föld lakói. Ezek a túlélők a szá-

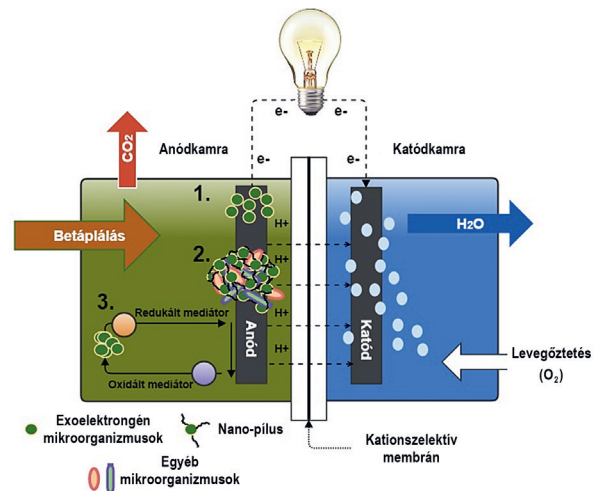


1. ábra. A világ nagyvárosaiban keletkező hulladék mennyiségének alakulása

munkra láthatatlan baktériumok, melyek rendkívül változatosak és egészen extrém környezetben is előfordulnak. A tudomány fejlődésével és a baktériumok megismerésével egyre bővül azon törzsek száma, amelyek valamilyen formában hasznosak az emberiség számára. Hulladékkezelés szempontjából például az egyik legrégebbi biológiai kezelési mód a komposztálás, ahol a szabad ég alatt történik a szerves hulladék ártalmatlanítása. Előnye, hogy az eljárás után visszamaradt anyag talajjavítóként felhasználható. A szervesanyag-tartalmú hulladék másik ártalmatlanítási formája, mely szintén nagy múltra tekint vissza, a metanogén fermentáció vagy *biogáz-előállítás*. Ez esetben, a komposztálással ellentétben, az oxigén kizárásával (anaerob) másféle baktériumcsoportok (hidrolizáló, acetogén, metanogén baktériumok) tevékenysége érvényesül. Az itt lejátszódó folyamatok révén a felhasználható, visszamaradó anyag mellett a biogáz is megjelenik, mint termék. A biogáz metántartalma révén energetikai célokra is felhasználható. Kellő tisztítás után akár biometánként a gázhálózatba is vezethető, csökkentve a felhasználni kívánt fosszilis eredetű föld-

gáz mennyiségét. Egy másik feltörekvő, szintén anaerob biodegradációs (biológiai lebontás) eljárás a *hidrogénképző* (sötét, vagyis fény jelenlétét nem igénylő) *fermentáció*. Itt a megjelenő termék a hidrogén, mely ígéretes energiaforrás lehet a jövőben. Míg az aerob komposztálás esetén energetikai hasznosítás nem történik, addig az anaerob biogáz és a fermentációs folyamatok révén keletke-

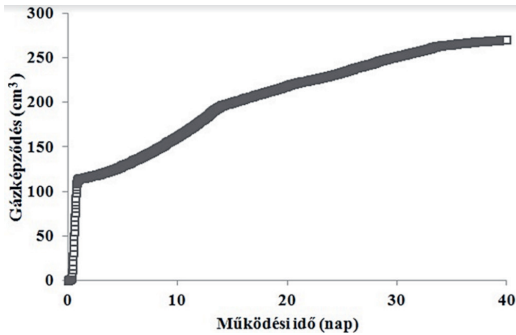
ző termékek (biogáz, hidrogén) felhasználásával energiát nyerhetünk ki a szervesanyag-tartalmú hulladék ártalmatlanítása mellett [4].



2. ábra. Kétkamrás mikrobiális üzemanyagcella felépítése

Hulladékból tiszta energia?

Az utóbbi évtizedekben olyan baktériumokra is felfigyeltek a kutatók, melyek képesek közvetlen elektromos energia előállítására. Ezeket a törzseket gyűjtőnéven exoelektrogén mikroorganizmusoknak, vagy anódlégző baktériumoknak (anode-respiring bacteria) nevezik. Az exoelektrogén baktériumok általi energiatermelés az úgynevezett *mikrobiális*



3. ábra. A biogáz-képződés eredménye

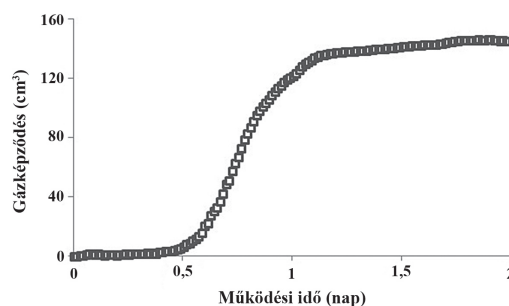
üzemanyagcellában valósul meg. Ez egy bioelektrokémiai rendszer, melynek két fő típusa terjedt el, az egykamrás és kétkamrás változat. A 2. ábrán egy klasszikus kétkamrás mikrobiális üzemanyagcella sematikus felépítése látható. Három fő alkotórészre bontható, egy anaerob anódkamrára, egy aerob katódkamrára, melyekbe egy-egy elektróda kerül, és végül a két kamra között lévő általában kationszelektív membránra. Megfelelő körülmények kialakításával az anódkamrában lévő anódon az exoelektrogén mikroorganizmusok elszaporodása révén biofilm alakul ki. Itt történik a szerves anyagok lebontása, mely során elektronok (e^-) keletkeznek. Ezt követően a keletkezett elektronokat a baktériumok képesek továbbítani az anód elektródára. Az elektronátadás többféle módon lehetséges: (1) közvetlen elektronátadással, (2) mikroorganizmusok által növesztett, úgynevezett elektromosan vezető nanovezetékek (pílusok) révén, (3) bizonyos elektronközvetítő (mediátor) anyagok révén (2. ábra).

Az anódon át egy külső vezetéken történik az elektronok vándorlása (elektromos áram) az elektroneutralitás elve révén a katód irányába. Ezzel egyidejűleg az elektronok mellett protonok is keletkeznek (H^+), melyek a kamrák közötti kation- (proton) szelektív membránon keresztül jutnak át a katódkamrába. Az aerob, általában levegőztetett katódkamrába érkező elektronok és protonok a jelenlévő oxigénnel egyesülve vizet alkotnak. A kétkamrás kialakításnál szükséges a membrán megléte. A membrán mellett, hogy összekapcsolja a két kamrát (protonát-eresztés), egyben el is szigeteli azt, mivel a katódkamrában lévő oxigént nem engedi át az oxigénmentes anódkamrába, megakadályozva az ott élő exoelektrogén közösségek károsodását. A mikrobiális üzemanyagcella legfőbb előnye közé sorolható a folyamatos, közvetlen elektromos energiatermelés és a hatékony szer-

vesanyag-lebontás. A mikrobiális üzemanyagcella egyelőre kutatási fázisban van, egyes lebontási mechanizmusai még nem teljesen tisztázottak. Előnyei mellett elterjedésüket hátráltatja az energiatermelési kapacitásukhoz mérten viszonylag magas anyagköltség (membrán, elektródák). Mindazonáltal egyre több kutató érdeklődik a mikrobiális üzemanyagcellák iránt, ennek köszönhetően növekszik a hatékonyságuk, valamint további hasonló bioelektrokémiai rendszerek is megjelentek. Az egyik ilyen például a mikrobiális elektrolízáló cella, melynél az exoelektrogén mikroorganizmusok által termelt többlet elektromos áram hidrogén előállítására (elektrolízis) fordítódik. [5, 6, 7, 8, 9]

Hazai példa

A továbbiakban a már említett biogáz, hidrogén-fermentációs és mikrobiális üzemanyagcellás eljárásokkal kapcsolatos eredményeket mutatom be egy magyarországi hulladékkezelő telepről származó speciális szennyvíz esetében. A kísérleteket a veszprémi Pannon Egyetem Biomérnöki, Membrántechnológiai és Energetikai Kutató Intézetében végeztem el. Mindhárom biológiai lebontás könnyebb összehasonlíthatósága érdekében, ugyanazt a kezelni kívánt anyagot vizsgáltam. Figyelemmel kísértem az



4. ábra. A hidrogén-fermentáció eredménye

egy-egy eljárás ártalmatlanítási hatásfokát, melyről a betáplált szennyvíz kémiai oxigénigényének (KOI) változása nyújtott átfogó információt. A KOI meghatározásánál lényegében az oldatban jelen lévő szerves anyagok kémiai lebontásához szükséges oxigén mennyiségét értjük. A keletkező termékek (biogáz, hidrogén és bioelektromosság) mennyiségéből pedig kiszámolhatók a lebontási módokhoz kapcsolódó energetikai paraméterek.

Az Észak-Balatonai Hulladékgazdálkodási Projekt keretein belül újjáépített királyszentistváni hulladékkezelő telepre érkező 158 település szilárd hulladékának a válogatása során egy szerves anyagban gazdag frakciót (biofrakciót) különítették el. Ezt jelenleg aerob módon, komposztálással stabilizálják, majd a lerakóra helyezik és gépekkel tömörítik. A komposztálást megelőzően a biofrakcióból préseléssel nyert szennyvizet vizsgáltam a már említett anaerob eljárásokkal. A betáplált szennyvíz (szubsztrátum) lebontásához szükséges mikroorganizmus-tömeget (inokulum) a páhalmi biogázüzem rothasztó tartályából származó iszap szolgáltatja. Korábbi alap- és alkalmazási eredmények segítségével, a kezdeti nehézségeket áthidalva (pl. még teljesen új, ismeretlen anyag) már célirányosan folytatták a mérések. [5, 6]

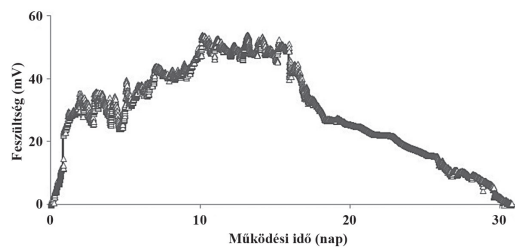
Beszéljenek a számok!

A biogáz-képződés igen komplex, többlépcsős folyamat, mely során különféle mikroorganizmusok szimbiotikus kapcsolatban tevékenykednek. Minden törzsnek megvan az adott feladata, melyek elvégzésével más törzsek elterjedését segíthetik elő. Megfelelő körülmények biztosításával először a hidrolízáló baktériumok bontják a nagy molekulájú szerves vegyületeket. Az így keletkezett rövidebb szénláncú anyagok (zsírsavak) lebontását már egy másfajta baktériumcsoport alakítja át egyszerűbb anyagokká (szerves savak, ecetsav). Végezetül a metanogén baktériumok révén ecetsavból és hidrogénből biogáz képződik. A baktériumok tevékenységének nyomon követésére manometrikus mérőfejeket (WTW oxitop 100) használtam, mivel ezek képesek egy adott gáztér (például egy mérőedény) nyomásváltozásának követésére. A 3. ábrán látható a biogáz-képződés okozta nyomásemelkedés egy 40 napig tartó kísérlet során 37 °C-os hőmérsékleten.

A detektált nyomásértékekből az ideális gáztörvény révén ($p \cdot V = n \cdot R \cdot T$) kiszámolható a keletkezett gázmennyiség, valamint 0 °C-ra és 101,325 kPa nyomásra való átváltásával kiszámolhatóak a biogázra jellemző energetikai paraméterek. A gázminta gázösszetételének meghatározása gázkromatográfia segítségével történt. Ez idő alatt a speciális szennyvíz és beoltóiszap 1:1 arányú 50 ml osztérfogatú eleyéből 527 cm³ biogázt sikerült előállítani 0 °C-ra és 101,325 kPa nyomásra vonatkoztatva. Az energetikai számítások alapján ez 11 745 J elméleti energiának felel meg. Egy biogázmotor elektromos áram előállításának hatékonysága 35% körüli, tehát

4110 J energia nyerhető ki a keletkezett közel 60%-os metántartalmú biogáz felhasználásával.

Hidrogén-fermentáció során a biogáz-képződéshez hasonló folyamat történik, azonban ebben az esetben az utolsó lépés (metanogenezis) már hátrányos a hidrogéntartalomra nézve. Ahhoz, hogy megakadályozzuk a metanogének tevékenységét, előkezelést célszerű alkalmazni, mely során az érzékenyebb metántermelő baktériumok jelentős része elpusztul. Számos paraméter közül akár a kezdeti enyhén savas környezet (pH ~5), és egy rövid ideig tartó (30–45 perc) hőkezelés (75 °C) is hatékony lehet. A kezdeti folyadékkelegy összetétele meg-



5. ábra. A mikrobiális üzemanyagcella-kezelés eredménye

egyezett a biogáz-kísérletben leírtakkal. Az előkezelés után a hidrogén-fermentációs kísérlet 2 napig tartott. A WTW 100 mérőfejjel mért eredmények 37 °C-on a 4. ábrán láthatóak.

A kísérlet során 0 °C-ra és 101,325 kPa nyomásra vonatkoztatva 91 cm³ hidrogén keletkezett, aminek az elméleti energiatartalma 1140 J. A keletkező hidrogén üzemanyagcellában történő felhasználásával, jellemzően 65 % hatékonysággal számolva, 741 J energiához juthatunk.

A mikrobiális üzemanyagcella „beüzemelési” szakasza során, az anódfelületre tapadó exoelektrogén mikroorganizmusok szaporodását egy többkörös etetési, vagy felnevelési folyamat segíti elő. Ekkor a számukra könnyen bontható tápanyag (acetát, glükóz) és megfelelő környezet biztosításával felgyorsítjuk az anód elektródán kialakuló stabil biofilm kialakulását. A vizsgálni kívánt anyag betáplálását csak ezt követően célszerű elvégezni az anódkamrába a pontosabb eredmények szempontjából. Az előzetes biofilm kolonizáció (felnevelés) a beoltószappal történt, többszörös nátrium-acetát oldat adagolásával. A biofilm kialakulását követően, az anódcellában lévő beoltószap cseréjével a korábbi vizsgálatoknál is alkalmazott 25 ml mennyiségű biofrakcióból származó

szennyvizet adagoltam. Számítógépes adatgyűjtő rendszer segítségével digitálisan nyomon követhető az exoelektrogének tevékenysége. Ha számukra kedvező anyag jelenik meg, megtörténik a lebontás során keletkező elektronok áramlása, melyet a két elektróda közötti potenciálnövekedés jellemez. Ezt a feszültségnövekedést rögzítve, és a rendszerhez csatolt ellenállás ismeretében (jelen esetben: R =100 Ω) kiszámolható az áramerősség, az elektromos teljesítmény és többek között a kumulált energiakihozatal is. Az 5. ábrán látható a betáplálást követő hirtelen potenciálemelkedés, mely 31 napos üzemelés után visszaállt az eredeti értékre. [5, 6]

Az adatok alapján a betáplált szennyvízből 31 J közvetlen energia volt kinyerhető. Ha fenntartjuk a megfelelő körülményeket és gondoskodunk a tápanyag utánpótlásáról, a mikrobiális üzemanyagcellák képesek folyamatos üzemelésre is.

Az energetikai paraméterek mellett a környezetvédelmi szempontokat is figyelembe kell venni. A páhalmi beoltószap pH 7,5 mellett a kémiai oxigénigénye 17 g L⁻¹, a szennyvíz pH 4,9 és a kémiai oxigénigénye 97 g L⁻¹ volt.

Az 1. táblázatban látható összefoglalva a különféle eljárások során elért kémiai oxigénigény-csökkenés. [10]

A hidrogén-előállítás kisebb mértékű, 9%-os csökkenést jelentett a kémiai oxigénigényben, viszont működési ideje jóval kevesebb volt a többi eljáráshoz képest. A biogáz előállítása 50%-os csökkenést produkált 40 napos működés mellett. A mikrobiális üzemanyagcella esetén a kémiai oxigénigény csökkenése 92%-os volt a kezdeti értékhez képest a 31 nap során, ami jelentős lebontási hatékonyságot je-

Lebontási folyamat	KOI-eltávolítás mértéke (%)
Biogázképződés	50
Hidrogénfermentáció	9
Mikrobiális üzemanyagcella	92

A különféle eljárások során elért kémiai oxigénigény-csökkenés összefoglalása

lent, azonban ez még elmarad a felszíni befogadókra (folyók) vonatkozó határértékekhez képest.

A kutatási eredményekből is látható, hogy többféle módon juthatunk környezetkímélő energiához, akár a számunkra felesleges, vagy veszélyes hulladék felhasználásával is. Az említett három eljárás csak tö-

redéke a létező fenntartható energiatermelő lehetőségeknek. Az azonban bizonyos, hogy minél több lábón állunk, minél változatosabb módon jutunk energiához, annál kevésbé leszünk kiszolgáltatottak. Bizom abban, hogy a világban elkezdődött szemléletváltozás kitart, és egyre több figyelmet fordítunk majd a globális környezeti problémák kezelésére egy élhető és fenntartható jövő építése érdekében.

Az írás a Magyar Tudományos Akadémia Természettudományi Kutatóközpontja (MTA TTK) és a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat (TIT) közös ismeretterjesztő cikkpályázatára érkezett.

Irodalom

[1] D. Hoorweg, P. Bhada-Tata: What a waste, A Global Review of Solid Waste Management, World Bank, No. 15. (2012)

[2] Országos Hulladékgazdálkodási Terv (OHT II.)

[3] Eurostat adatbázis: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Environment>

[4] Bakonyi, P., Nemestóthy, N., Ramirez, J., Ruiz-Filippi, G., & Bélafi-Bakó, K.: Escherichia coli (XL1-BLUE) for continuous fermentation of bioH₂ and its separation by polyimide membrane. International journal of hydrogen energy, 37 (7), 5623-5630. (2012)

[5] Rózsenberszki, T., Koók, L., Hutvágner, D., Bakonyi, P., Kurdi, R., Sarkady, A., Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K.: Comparison of anaerobic degradation processes for bioenergy generation from liquid fraction of pressed solid waste. Waste and Biomass Valorization, Volume 6, Issue 4, pp 465-473. (2015)

[6] Koók, L., Rózsenberszki, T., Bakonyi, P., Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K.: Bioelectrochemical treatment of municipal waste liquor in microbial fuel cells for energy valorization. Journal of Cleaner Production, 112, 4406-4412. (2016)

[7] Logan, B.E.: Microbial Fuel Cells. Wiley, New York (2008)

[8] Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, V., Rabaey, K.: Microbial fuel cells: methodology and technology. Environmental science & technology, 40(17), 5181-5192. (2006)

[9] Rabaey, K., Verstraete, W.: Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. TRENDS in Biotechnology, 23(6), 291-298. (2005)

[10] APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th edn. American Public Health Association, New York (1995)