

Válaszok Dr. Kovács Kornél bírálatára

Először is szeretném megköszönni Dr. Kovács Kornél Professzor Úr alapos, lényeglátó és konstruktív bírálatát. Professzor Úr biogáz tematikájú konferenciákon tartott előadásából többször volt lehetőségem inspirálódni és az anaerob mikrobaközösségek elismert szakértőjeként számos olyan pontra mutatott rá a bírálatában, melyből a válaszok megfogalmazása közben már sokat tanultam. A Professzor Úr által megfogalmazott megjegyzésekre, kérdésekre, javaslatokra, kritikai észrevételekre az alábbiak szerint válaszolnék.

Megjegyzés #1: Az egyébként gondosan kivitelezett dolgozatban kicsit formailag zavarónak találtam, hogy több ábra kirívóan homályos, gyenge felbontású képként került a dolgozatba (például 8, 26, 37, 45, 51 ábra), pedig ezek jelentős része „saját” ábra. A pontatlan, magyartalan megfogalmazások a mai szövegszerkesztő programok használatának hála egyre kisebb számban fordulnak elő a tudományos dolgozatokban. Ilyen zavaró megfogalmazás például a 3. oldalon „(... az elektródok közötti kisebb távolság miatt nagyobb fokozottabb veszélyt jelentő oxigénbehatolás...). Engem ennél sokkal jobban zavart, hogy a különböző kísérletekben, a szövegben és ábrákon gyakran eltérő elnevezéseket használ ugyanarra a membrán komponensre.

Válasz #1: Köszönöm Professzor Úr megjegyzését, kritikájával egyetértek. Az említett szempontokból nyílt volna még tér az értekezés minőségének javítására. Köszönöm, hogy mindezen zavaró tényezők mellett is, azok ellenére is, részletesen tanulmányozta a dolgozatot és alapvetően pozitívan ítélte meg annak tudományos tartalmát.

Megjegyzés #2: Az elektrokémikus szemével nézve a MÜC, legfontosabb elemei az elektród, az elektrokémiai cella kialakítása, az anód és katód térrészek kapcsolata, az áramkör formálása az optimálisan minél magasabb áramsűrűség kialakítása érdekében. A mikrobiológus szemével nézve ugyanilyen fontos a mikrobiológiai rendszer kezelése, optimalizálása, az élő mikrobák világa és az élettelen elektrokémiai komponensek közötti kapcsolatok alakulása. Ebből a megközelítésből kiindulva hiányolom, hogy a „klasszikus” MÜC rendszerek mellől hiányzik annak bemutatása, ami az utóbbi évek — szerintem - egyik legfontosabb fejlődési iránya. Az irodalmi áttekintés a mikrobiológiai elektrokémiai technikák (MET) fejlesztésének csak egy szegmensét tárgyalja, a 2 cellás és oxigénnel táplált katód tér rendszert alkalmazó, anaerob fermentációs mikrobiológiát vizsgáló anód folyamatokat. Az utóbbi 14-16 évben szaporodtak el azok az alternatív mikrobiológiai elektrokémiai megoldások, amelyek a katód térben az oxigén redukciója helyett más vegyületeket redukálnak. Így például legegyszerűbben széndioxidból metánt állíthatunk elő a mikrobiális elektrolízis cellában (MEC), vagy egyéb termékeket a hasonló elven működő mikrobiális elektroszintézis (MES) rendszerekben.

Válasz #2: A dolgozat felépítésének meghatározásakor igyekeztem úgy eljárni, hogy a bemutatott eredmények szempontjából legrelevánsabb információkat közöljem, így a szakirodalmi áttekintésben a mikrobiális üzemanyagcellák bemutatására helyeztem a hangsúlyt. Természetesen, egyetértve azzal, hogy az elektrolízis üzemmódban működtetett bioelektrokémiai rendszerek is egyre hangsúlyosabb szerepet kapnak a kutatásokban, ezekre a dolgozat 8. fejezetében („Kitekintés, lehetséges fejlesztési irányok”) magam is fontosnak tartottam kitérni, megemlítve és hivatkozással alátámasztani a hazai legfontosabbnak ítélt fejlesztési aspektusokat ([91-95] referenciák a dolgozatban), valamint egyúttal hangsúlyozni, hogy a mikrobiális üzemanyagcellák tovább gondolásával katód oldalon hidrogén gázt termelő,

illetve CO₂-alapon szintézist megvalósító mikrobiális elektrokémiai rendszerek is megtalálhatók a palettán (értekezés 76. oldal, utolsó mondat).

Megjegyzés #3: A 2.3.2. Exoelektrogén mikroorganizmusok. c. fejezetben általánosságban bemutatja az exoelektrogén mikroorganizmusokat, a direkt és indirekt elektrontranszfer folyamatokat. Ide becsúsztott egy véleményem szerint hibás adat az exoelektrogén mikrobákról, miszerint „relatív gyakoriságuk (abundanciájuk) egy természetes populáción belül gyakran rendkívül alacsony (akár 0.01-0.001 %)” A kevert anaerob mikroba közösségekben valóban jellemzően alacsony az exoelektrogén mlkrobák aránya, de a mai molekuláris biológia módszerekkel 0.01-0.001 % gyakoriságot megbízhatóan nem tudunk kimutatni. A <0.1% körüli relatív abundancia kimutatási alsó határ már nagyon jó minőségű szekvenálást jelez. A hiányosan leírt saját kísérletekben, például 30. és 47. ábrák alapján becsülve ezt sem sikerült elérni ezekben a kísérletekben.

Válasz #3: Köszönettel elfogadom az előremutató megjegyzést. Sajnos a dolgozatban ezt a mondatot nem hivatkoztam, de sikerült visszakeresnem és egy amerikai szerzőpáros által jegyzett közleményben találtam adatot arra vonatkozóan, hogy *Geobactert* <0.01 % relatív abundanciával is kimutattak az inokulumban (Q. Cheng, D.F. Call. *Developing microbial communities containing a high abundance of exoelectrogenic microorganisms using activated carbon granules. Science of The Total Environment Volume 768, 10 May 2021, 144361.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144361>). Az általuk választott mikrobakonzorcium analízis több ponton hasonlóságot mutat azzal a módszerrel, melyre hosszú időn keresztül mi magunk is támaszkodtunk, de persze az ördög a részletekben rejlik és elképzelhető, hogy erősebb forráskritikát kellett volna alkalmaznom.

Kérdés #4: A 7. ábra szerint a „gold standard” Nafion membránnal összehasonlítva a polimer-szervetlen kompozit (PIC) membránokat kivéve minden membrán típus jobbnak mutatkozik a maximális teljesítmény sűrűség tekintetében, mint a Nafion membrán. Mivel magyarázza, hogy ennek ellenére a nemzetközi szakirodalomban mégis a Nafion membrán az elfogadott standard megoldás?

Válasz #4: A Nafion membrán standardként (összehasonlítási alapként) való használatának alapvetően történeti okai vannak. A Nafiont (DuPont) hagyományosan a hidrogénüzemű, protoncsere membrános tüzelőanyagcellákban (PEM Fuel Cells) kezdték alkalmazni, és referenciaként meghonosodott a mikrobiális üzemanyagcellák területén is.

Kérdés #5: A 7. ábra szerint a Ceramic membránok magasan jobban teljesítenek, mint bármelyik itt felsorolt 6 másik membrán típus. Mi az oka, hogy a nemzetközi K+F gyakorlatban mégis elenyésző számban és érdeklődéssel tanulmányozzák a Ceramic membránokat?

Válasz #5: A kerámia membránok egy igen érdekes csoportot képviselnek. Előnyeiként szokták említeni, hogy relatíve olcsók lehetnek, tartósak, ellenállók kémiai ágensekkel szemben (amelynek pl. a biofouling elleni küzdelemben alkalmazott tisztítás során lehet szerepe). Ugyanakkor mivel jellemzően pórusosak, ezért nem ion szelektívek, hanem méret szerint szelektálnak molekulákat. A pórusméret és annak eloszlása függvényében van lehetőség arra, hogy a mikrobatelepek a membránban mélységében is kialakuljanak, nem csak a felületen, ezért aztán ez jelenthet plusz kockázatot a hosszútávú üzemelés során (D.A. Jadhav, et al. *Current outlook towards feasibility and sustainability of ceramic membranes for practical scalable applications of microbial fuel cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 167, October 2022, 112769.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112769>). Hátrányuk lehet még, hogy

nehéz őket (pl. néhány 100 mikron) vékonyan elkészíteni, és a vastagabb membránok alkalmazása kifejezetten nem előnyös a cella belső ellenállásának növekedése miatt. Így összességében véleményem szerint ez lehet az oka, hogy a prioritási sorrendben a kerámia membránok relatíve hátrább helyeződtek. Az is igaz ugyanakkor, hogy vannak nagyon érdekes (kiugró) eredmények kerámia membránokkal. Bár ez pro- és kontra igaz: időként meglepően alacsony az elérhető teljesítménysűrűség, időnként meglepően magas, nagyon nagy a szórás a többi membrános rendszerrel összevetésben. Amikor az ominózus elemzést készítettük (dolgozat 7. ábrája) akkor próbáltuk mindig visszaellenőrizni, hogy nem arról van-e szó ezen extrém (publikált) értékek esetén, hogy azt valamilyen (pl. mértékegység) átváltási probléma okozza. Több esetben azonban nem volt közölve minden szükséges részlet, hogy az ellenőrző számításokat korrekt módon elvégezhessük, így aztán az a döntés született, hogy elfogadjuk, amit a szerzők közöltek, végül nem kezeltük kilógóként (outlier) ezen értékeket.

Kérdés #6: A 2.3.5. Membrán fejlesztési irányok. c. fejezetben bemutatott 10. ábrán összefoglalja a MUC membrán fejlesztési irányokat. Az ábra és a szöveges leírás korrekt, alapos. Kivéve — és itt ismét visszaköszön az átfedő, de eltérő tudományos érdeklődésünk, hogy a „Fejlesztendő tényezők” dobozból csak az „Abiotikus” irányba vezet a további tennivalók felé vezető út. A „Biotikus” irányba nem lát/javasol fejlesztési lehetőségeket? Ezért van további fejlesztést nem igénylő zsákutcaként feltüntetve az ábrán?

Válasz #6: A válasz természetesen igen, a cella biotikus komponensének fejlesztése ugyanolyan fontos kérdés, mint a rendszer egyéb elemeinek fejlesztése, köztük a membrané. A felvázolt 10. (folyamat)ábrán a membrán szerepére fókuszáltam, s részleteiben kilehetne ezt fejteni az elektro-aktív biofilm irányába is. Meg is tették és teszik is ezt a területtel foglalkozó kutatók, a biofilm mérnökség és vonatkozó stratégiák egy tudományosan is kifejezetten izgalmas terület (*M.A. Angelaalincy, et al. Biofilm Engineering Approaches for Improving the Performance of Microbial Fuel Cells and Bioelectrochemical Systems. Front. Energy Res. 6:63. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00063>*).

Kérdés #7: Az anód és katód térben a folyadék fázis homogén eloszlását hogyan biztosították? A szövegben kevertetésről nem esik szó, pedig a cellákon belüli és az elválasztó membrán körüli áramlási viszonyok jelentősen befolyásolják a biofilm képződés időbeli alakulását és a rendszer fenntartható működésének stabilitását. Az áramlási viszonyokat hogyan standardizálták/optimalizálták?

Válasz #7: A mikrobiális üzemanyagcellák katód térben a bevezetett/beporlasztott levegő minden esetben biztosította a megfelelő homogenitást („coarse bubble operation strategy”). Az anód oldal tekintetében a helyzet komplexebb.

Az értekezésben bemutatott kísérletek kezdeti-korai szakaszában (2010-es évek közepe) mechanikai keverés a kisebb munkatérfogatú (60-160 mL) rendszerekben nem történt. Az e mögötti legfőbb megfontolás az volt, hogy bár a keverés egy bioelektrokémiai cellában hasznos lehet a diffúziós gátak csökkentésében, a lokális inhomogenitások megszüntetésében és a turbulens áramlás kialakításában, amely így végeredményben az elektrokémiai hatékonyság növelése irányába hat (*F.F. Ajayi, et al. Effect of hydrodynamic force and prolonged oxygen exposure on the performance of anodic biofilm in microbial electrolysis cells. Int. J. Hydrogen Energy 35, 3206–3213. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.057>*), figyelembe veendő egyúttal az is, hogy az intenzívebb keverés mellett kialakuló hidrodinamikai viszonyok olyan nyíróerőket hozhatnak létre, mely stresszként jelentkezik az elektródfelületi biofilm szempontjából és így akár annak destabilizálódását is kiválthatja (különösen, hogy ezen biofilmek jellemzően <100 mikron vastagságúak). E tekintetben hivatkozhatunk Vilas Boas és

munkatársai 2015-ben publikált eredményeire, miszerint turbulens áramlási kép (Reynolds-szám: 8397) mellett, a fokozott nyíróerőkre válaszul a polarizációs görbén mért teljesítménysűrűség visszaesik a nem kevertetett esethez (Reynolds-szám: 0) képest, mert az elektrokémiai aktív biofilm szerkezete kompaktabbá válik, a rendszer belső ellenállása megnő és így végeredményben csökken a cella hatékonysága (J. Vilas Boas, et al. *Effect of operating and design parameters on the performance of a microbial fuel cell with Lactobacillus pentosus*. *Biochem. Eng. J.* 104, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.05.009>). Az anód oldali nem-keverés pozitív hatását illetően érdekes eredményekkel találkozhattunk a Bruce Logan csoport jóvoltából is még a 2000-es évek közepén (B. Min, et al. *Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells*. *Water Research Volume 39, Issue 20, December 2005, Pages 4961-4968*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.039>). A szerzők konklúziója szerint az anolit nem-kevertetése statisztikailag szignifikánsan növelte az elért teljesítménysűrűséget a kevertetett anolitos esethez képest ($128 \pm 3 \text{ mW/m}^2$ vs. $118 \pm 2 \text{ mW/m}^2$), melynek hátterében a biofilmen belüli szubsztrát (illékony szerves savak) koncentrációs viszonyok, valamint az anód-katód közötti oxigén fluxus megváltozását tételezték fel.

Később aztán, a 2020-as évek elejétől, a megnövelt (285 mL) munkatér fogatú cellákban (értekezés 25 oldal, 21. ábra) azt tapasztaltuk, hogy az anolitban még az intenzív (400-500 rpm) mechanikai (mágneses) keverés sem okozta az elektro-aktív biofilmek észlelhető károsodását (és a cellateljesítmény visszaesését), amelyben véleményem szerint a szénfilm anód protektív belső szerkezete is szerepet játszhatott. Így végül a kevertetett rendszerek irányába történő elmozdulást választottuk, amely jobban illeszkedik pl. kémiai összetettebb szubsztrátok mikrobiális üzemanyagcellákban való hasznosításához, éppen az elmúlt időszakban nyújtottuk be kéziratunkat egy acidogén mikrobiális konverzió fermentlevéből elektrodialízis technikával kinyert szerves sav keverékkel kapcsolatos kutatási eredményeinkről (Sz. Szakács, et al. *A novel polyaniline-coated membrane improves the performance of microbial fuel cells fed by single, mixed and waste-sourced volatile fatty acids*. *Water Resources and Industry*, bírálat alatt). Szakirodalmi adatok tanulsága szerint (H. Bird, et al. *Understanding the limitations of substrate degradation in bioelectrochemical systems*. *Front. Microbiol.* 15:1511142. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1511142>) az anódoldali keverés szerepe kardinálissá válik komplexebb szubsztrátok (pl. keményítő) felhasználása esetén, a mikrobaközösség adaptációjának, az elektro-aktív biofilm fejlődésének elősegítése érdekében.

Kérdés #8: Mi indokolta a MÜC szakaszos betáplálását annak ellenére, hogy a kísérleti berendezésen (21. ábra) rendelkezésre álltak a folyamatos szubsztrát betáplálást biztosító csatlakozási lehetőségek?

Válasz #8: Köszönöm Professzor Úr kérdését. Valóban, a 21. ábrán bemutatott H-cella mindkét elektródtér esetén több csatlakozási lehetőséggel rendelkezik, így technikai lehetőség lett volna a folyamatos üzemmódra való átállásra. Hogy ez nem történt még meg, annak fő oka, hogy bár a szakirodalmi tapasztalatok szerint a H-cella egy kiváló konstrukció alapjelenségek vizsgálatához főként szakaszos/rátáplálós működtetésben, a (teljesítmény szempontjából) jól működő folyamatos rendszerek inkább más cellakonstrukcióban, úgynevezett stack (cellaköteg) elrendezésben valósítandók meg (S.B. Pasupuleti, et al. *Continuous mode operation of microbial fuel cell (MFC) stack with dual gas diffusion cathode design for the treatment of dark fermentation effluent*. *International Journal of Hydrogen Energy Volume 40, Issue 36, 28 September 2015, Pages 12424-12435*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.049>), melyekről röviden magam is teszek említést az értekezés érdemi részének záró fejezetében (8. Kitekintés, lehetséges fejlesztési irányok).

Kérdés #9: Közismert, hogy az első kísérletek nyomán a MÜC rendszerek „táplálására” elsősorban acetátot használnak világszerte a K+F laborokban. Ez összehasonlítható és reprodukálható szubsztrát bevitelt jelent, de nem ismert, hogy egyéb szubsztrátok (pl. cukrok, fehérjék/aminosavak, biológiailag lebontható biopolimerek egyéb szennyvíz komponensek, stb) esetében mik az ajánlott/optimális fermentációs paraméterek? Hasonlóképpen a hatékonyság és stabilitás szempontjából fontos paraméter az időnként beadagolt szubsztrát fermentáció időbeli dinamikája. Ilyen elemzéseket végeztek? Ha igen, milyen eredménnyel zárult ez a munka?

Válasz #9: Ez egy gyakorlati szempontból nagyon fontos kérdés. A szubsztrát minőségére, összetételére vonatkozóan elmondható, hogy kutatásaink során vizsgáltunk olyan mikrobiális üzemanyagcellákat, melyeket valós, komplex anyagáramokkal üzemeltettünk. Példaként állhat itt lakossági hulladéklerakóról származó, szennyvíz jellegű (a beérkező kommunális hulladékból válogatott, biológiailag bontható frakció mechanikai préselésével nyert) folyadék. Tapasztalataink szerint ezen frakció mikrobiális üzemanyagcellában való hatékony kezelésének sarokkövei a megfelelő adagolás (szubsztrát koncentráció) beállítása (László Koók, Tamás Rózsenberszki, Nándor Nemestóthy, Katalin Bélafi-Bakó, Péter Bakonyi. *Bioelectrochemical treatment of municipal waste liquor in microbial fuel cells for energy valorization. Journal of Cleaner Production Volume 112, Part 5, 20 January 2016, Pages 4406-4412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.116>*), valamint a többlépcsős, konszekutív (fermentációs+bioelektrokémiai) eljárás megvalósítása (Tamás Rózsenberszki, László Koók, Péter Bakonyi, Nándor Nemestóthy, Washington Logroño, Mario Pérez, Gladys Urquizo, Celso Recalde, Róbert Kurdi, Attila Sarkady. *Municipal waste liquor treatment via bioelectrochemical and fermentation ($H_2 + CH_4$) processes: Assessment of various technological sequences. Chemosphere Volume 171, March 2017, Pages 692-701. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.114>*). Továbbá, szakirodalmi elemzést végeztünk azon mikrobiális üzemanyagcellákon, melyek sötét fermentációs hidrogéntermelő biofolyamatok elfolyóját voltak hivatottak kezelni. Ezen szennyvíz típusú frakciók tipikusan dúsak illékony szerves savakban és elektromos árammá való hatékony konverziójuk szempontjából vizsgáltuk a mikrobiális üzemanyagcellák konstrukciójának, üzemeltetési módjának, a térfogati szervesanyag terhelésnek a hatását. Fontos eredményként kimutattuk, hogy azon rendszerektől várhatunk megnövekedett teljesítménysűrűséget illetve Coulombikus hatásfokot, amelyek nagyobb anód felület/anolit munkatérfogat aránnyal rendelkeznek (László Koók, Nándor Nemestóthy, Katalin Bélafi-Bakó, Péter Bakonyi. *Treatment of dark fermentative H_2 production effluents by microbial fuel cells: A tutorial review on promising operational strategies and practices. International Journal of Hydrogen Energy Volume 46, Issue 7, 27 January 2021, Pages 5556-5569. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.084>*). Ez ilyen módon korrelál azzal a szakirodalmi ajánlással és a saját korábbi konklúzióinkkal, hogy folyamatos üzemű mikrobiális üzemanyagcellákat stack (cellaköteg) kialakításban célszerű megvalósítani.

Megjegyzés/Kérdés #10: A dolgozatban és az 53. sz. hivatkozásban is nagyon felületesen találhatók meg a mintakészítés, szekvenálás és adatkiértékelés metodikai részletei. Hiányoltam, hogy az analízis módszertanát és emiatt a hasonló szakirodalmi munkákkal való összehasonlítást lehetővé tevő kísérleti körülményeket nem részletezte. A dolgozatban bemutatott összes mikrobiom analízis vizsgálatot azonos metodikával végezték?

Válasz #10: Professzor Úrnak igaza van, a dolgozatban valóban csak az analízis főbb körvonalai kerültek ismertetésre, a részleteket illetően pedig – melyeket annak idején a külsős szolgáltató céggel előzetesen egyeztettünk – a szabad hozzáférésű releváns publikációnkra

hivatkozok ([53]). A vizsgálatainkhoz választott 16S riboszomális RNS (rRNS) gént célzó ampikon szekvenálásnak ismereteim szerint négy fő lépése van: (1) minta előkészítés, (2) könyvtár készítés, (3) szekvenálás, (4) adatelemzés. Az MTA doktori értekezésem [53] számú hivatkozott publikációjának 2.5 fejezetében (Extraction of DNA, PCR amplification, sequencing, bioinformatics) ezekre az aspektusokra kitértünk: megadásra került a DNS izoláló kit típusa („ZymoBIOMICS 96 MagBead DNA Kit”), a kiindulási mintamennyiség („100-200 mg matrix per sample”), a kinyert teljes genomi DNS koncentráció ellenőrzésének lépése („Qubit 3.0 Fluorometer with Qubit dsDNA HS Assay Kit”), valamint a polimeráz láncreakcióhoz (PCR) használt primer páros típusa a 16S rRNS gén V3-V4 hipervariábilis régióinak felsokszorozásához („tagged primers (5'-TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGCCTACGGGNGGCWGCAG and 5'-GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGGACTACHVGGGTATCTAATCC”). Továbbá, megadtuk a könyvtár készítés és az Illumina platformon végzett génszekvenálás főbb körülményeit („PCR product libraries were quantified and qualified applying High Sensitivity D1000 ScreenTape on TapeStation 2200 instrument (Agilent). Equimolar concentrations of libraries were pooled and sequenced using Illumina MiSeq platform with MiSeq Reagent Kit v3 (600 cycles PE”), a kapott szekvenciák/readek feldolgozására, szűrésére vonatkozó protokollt („Ca. 400.000 raw sequencing reads/sample were generated in average and demultiplexed, adapter-trimmed, quality-filtered employing the MiSeq Control Software”), valamint a taxonómiai besorolásokhoz használt módszert és adatbázist („The classification was done in the Illumina 16S Metagenomics workflow based on the DADA2 formatted RefSeq RDP 16S v3 database”).

Értelmezésem szerint némi eltéréssel ugyan – például a DNS izoláló kit típusa tekintetében, melyet a külsős szolgáltató cég az évek során változtatott – de lényegében az [53] publikációban (Szabolcs Szakács, László Koók, Nándor Nemestóthy, Katalin Bélafi-Bakó, Péter Bakonyi. *Studying microbial fuel cells equipped with heterogeneous ion exchange membranes: Electrochemical performance and microbial community assessment of anodic and membrane-surface biofilms. Bioresource Technology Volume 360, September 2022, 127628. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127628>*) leírt módszer került alkalmazásra az értekezésben bemutatott mikrobakonzorcium analízishez. Részbeni kivétel ez alól az a munka, amely az értekezésem 1. tézispontjához kapcsolódik (László Koók, Elie Desmond-Le Quéméner, Péter Bakonyi, Jan Zitka, Eric Trably, Gábor Tóth, Lukas Pavlovec, Zbynek Pientka, Nicolas Bernet, Katalin Bélafi-Bakó, Nándor Nemestóthy. *Behavior of two-chamber microbial electrochemical systems started-up with different ion-exchange membrane separators. Bioresource Technology Volume 278, April 2019, Pages 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.097>*), mivel itt a francia együttműködő partnerek az általunk átadott nyers szekvenálási eredményeket (FASTQ formátumú fájlok) saját módszertanuk szerint dolgozták fel, pl. „Data were analyzed using the FROGS pipeline; Sequences were clustered using SWARM; Chimeras were removed with VSEARCH, Singletons were removed using the abundance filter and taxonomic affiliations were performed with RDP classifier using Silva 132 16S reference database; Bacterial diversity was analyzed using Phyloseq package in R”.

Megjegyzés/Kérdés #11: A 26. 27. 28. ábrákon bemutatott kísérleti eredmények egyetlen mérési sorozat eredményei, vagy párhuzamos mérések átlagai? Ha az utóbbi, mekkorák a kísérleti hibák és szórások? Mi számít szignifikáns változásnak a statisztikai elemzések alapján például a 28. ábrán bemutatott nyílt áramköri katód potenciál értékek tekintetében? Az 1. Táblázatban megadott belső ellenállás értékek meggyőzőbben igazolják diffúziós ellenállás meghatározó szerepét, ami egy fontos és értékes megfigyelés. Ráadásul itt még a szórások is fel vannak tüntetve.

Válasz #11: A 26-28. ábrához tartozó kísérletek mind a három membránnal egyszer kerültek indításra, így itt szórásokat és hibafaktort megadni nem tudok. Ennek oka volt például, hogy a K+F stádiumban lévő CEM és AEM membránokból kapott mintamennyiség is limitálta a párhuzamos méréseket. A 28. ábrán bemutatott nyílt áramköri feszültség (OCV) (melyek a 27. ábrán feltüntetett katód- és anódpotenciálok különbségeként számíthatódnak) tekintetében statisztikai (szignifikancia) értékelést nem végeztünk, azonban a tendenciák alapján egyértelműnek tűnik, hogy az idő előrehaladtával az AEM felszerelt mikrobiális üzemanyagcella működése volt a leghatékonyabb. Ez az eredmény önmagában ugyan csak indikatív (alátámasztó) lenne, de mivel egybevetve a belső ellenállás adatokkal (35. oldal 1. táblázat) és az anódok citokróm fehérje borítottságára vonatkozó számítás eredményével (5.1.3. fejezet), az összesített értékelés már véleményem szerint konklúzív, vagyis végső megállapítás megtételére alkalmas az AEM-nal felszerelt rendszerek szignifikánsan hatékonyabb működésére vonatkozóan. Az 1. táblázatban megadott átlag és szórás értékek két egymást követő (egy időpontban végzett) teljes cella polarizációs és elektrokémiai impedancia spektroszkópiás mérésekből származnak.

Megjegyzés #12: 5.1.2. Mikrobiológiai aspektusok az anódon kvalitatív szemmel. c. fejezet. Az eredmények alapján feltételezhető, hogy a minta előkészítés és/vagy a szekvenálás nem kiemelkedő minőségben készült. Az inokulumban az amplitikon szekvenálásoknál meglepően magas (>75%) arányban találtak, rendszertanilag ismeretlen („others”) besorolású mikrobákat. Ez azt jelenti, hogy a mikroba közösség túlnyomó többsége az ismeretlenség homályában maradt, ezeket nem sikerült nemzetség szinten sem azonosítani (29. ábra). Tehát a mikroba közösségről valóban csak nagyon kvalitatív, homályos képet nyújtottak ezek a kísérletek.

Válasz #12: Igen, egyetértek, a mikrobakonzorcium analízis eredményei nem minden esetben a várt eredményt hozták. Ahogy én látom, egyes vizsgált populációkban a genus taxonómiai besorolási szinten jelentős azonosítatlan („Others”) arány egy visszatérő probléma az amplitikon szekvenálásnál, a szakirodalmi adatok között – ahogy azt az alábbi két ábra is prezentálja – több esetben találunk 15-35 %-os (C. Lou, et al. *Up-flow anaerobic sludge blanket treatment of swine wastewater: Effect of heterologous and homologous inocula on anaerobic digestion performance and the microbial community. Bioresource Technology Volume 386, October 2023, 129463.* <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129463>) vagy akár 50-70 %-os hiányokat (X. Xu, et al. *Analysis of key microbial community during the start-up of anaerobic ammonium oxidation process with paddy soil as inoculated sludge. Journal of Environmental Sciences Volume 64, February 2018, Pages 317-327.* <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.026>). Illetve, tudomásom szerint az „Others” kategóriába sokszor nem csupán az „unclassified” rész, hanem az elhanyagolható relatív abundanciával (pl. <1 %) bíró mikrobacsoportok is integrálásra kerülhetnek (X. Mei, et al. *Adaptation of microbial community of the anode biofilm in microbial fuel cells to temperature. Bioelectrochemistry Volume 117, October 2017, Pages 29-33.* <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.04.005>), így a magas „Others” arány ilyen módon egy vegyes, árnyaltabb képet is mutathat. Azt is gondolom, hogy a mikrobakonzorcium analízis minőségének javítása érdekében az amplitikon szekvenálásról a jövőben érdemes lehet áttérni a shotgun metagenomikai (teljes genomi szekvenálás-alapú) elemzésre, árban nem sok különbség van már egy alacsonyabb leolvasás számú shotgun metagenomikai elemzés és egy amplitikon szekvenálás között.



biztosan nem lehel fajszintű azonosítást végezni, ezért a „... *Geobacter anodireducens*-t sikerült felszaporítani (szelektálni) az anódfelületen.” állítást barokkos túlzásnak kell tekinteni.

Válasz #14: Köszönöm Professzor Úr megjegyzését, melyet a mikrobiológiai nevezéktan tekintetében iránymutatónak tartok. A fent idézett mondat „*Geobacter anodireducens*-t sikerült felszaporítani (szelektálni) az anódfelületen” a dolgozat 37. oldalának 30. ábrájához kapcsolódik. Az ábrát megvizsgálva azt láthatjuk, hogy az anódon kialakult elektro-aktív biofilm minták esetén az „Others” csoport relatív abundancia értéke viszonylag alacsony (10-15 % között mozgott), s a *Geobacter* nemzetség relatív abundancia értéke mintegy 45-70 %. Úgy gondolom, hogy ezen esetekben az analízis megfelelő minőségben készülhetett, a mikrobák döntő hányadát sikerült nemzetség szinten is azonosítani. A fajszintű azonosítás kapcsán pedig – egyetértve Professzor Úr kritikai megjegyzésével és figyelemmel a 16S rRNS gént célzó amplikon szekvenálás korlátaira – lehet még nyitott kérdés azzal együtt is, hogy a *Geobacter anodireducens* később (tehát nem egyszeri „véletlen” alkalomként) úgyszintén előkerül a MEGA gyártmányú Ralex® membránokkal üzemeltetett mikrobiális üzemanyagcellákban kialakult elektródfelületi biofilmekben (dolgozat 63. oldal, 1. bekezdés).

Kérdés #15: A későbbi (5.2. fejezet) kísérletekben fontos szerepet kapott a membránon kialakuló biofilm, ami a cella belső ellenállását növelve annak hatékonyságát rontotta. Ilyen biofilm ebben a kísérletben is kialakult? Ha igen, annak a mikroba közössége milyen összetételt mutatott?

Válasz #15: Az 5.1.1. fejezetben tárgyalt vizsgálatokban a membrán eltömődési réteg, annak mikroba profilja még célirányosan nem került vizsgálatra, azonban pont eme rendszerből származó első tapasztalatok indították el annak szükségességét: a biofilm a membrán felszínen mind a Nafion PEM, mind a PSEBS DABCO AEM membránokon kialakult, ennek fotodokumentált bizonyítéka került bemutatásra az értekezés 41. oldalának 30. ábráján (5.2 fejezet).

Kérdés #16: 5.1.3. Mikrobiológiai aspektusok az anódon kvantitatív szemmel c. fejezetben érdekes és értékes ismereteket szerzett Bakonyi Péter és csapata a *Geobacter* nemzetség elektrokémiai aktivitásáról a ciklikus voltammetria alkalmazásával. Figyelemre méltó korrelációt talált a MÜC-ben kiemelkedő áramsűrűségi és energiakihozatali értékekkel büszkélkedő anion-exchange-membrane (AEM) esetében az anód redox fehérje borítottsággal. Ezt is egy nagyon fontos, új eredménynek tartom. Tényleg érdekes a korreláció, de kérem, magyarázza meg, hogyan kell értelmezni a jelenséget miszerint a cella két térrészét elválasztó membrán szerkezete/kémiai felépítése megváltoztatja a membrántól molekuláris léptékben mérve óriási távolságban levő anód felszínen kialakuló, zömmel *Geobacter* biofilm lefedettségét? Más szóval: honnan tudja az anódhoz igyekvő *Geobacter* azt, hogy milyen membrán választja el a MÜC két térfelét és hogyan befolyásolja ez az „ismeret” az ő anódhoz való affinitását?

Válasz #16: Ez a kérdés egy nagyon lényeges aspektusra világított rá. A talált korreláció mögötti magyarázat tekintetében a mi feltételezésünk az, hogy az kapcsolatban állhat a számos helyen a szakirodalomban dokumentált, az anioncserélő membránok használatával járó előnyökkel, különösen a két elektród térrész közötti pH eltolódás mérséklése tekintetében (R. Rossi, et al. *High performance flow through microbial fuel cells with anion exchange membrane. Journal of Power Sources Volume 475, 1 November 2020, 228633. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228633>*). A mikrobiális üzemanyagcella működése során gyakori jelenség, hogy az anólit savasodik, a katólit lúgosodik, s az anioncserélő

membránon keresztül a hidroxid ionok bejuthatnak az anód térbe, kompenzálva ezzel a szubsztrát konverzióból származó protonok pH csökkentő hatását. Ily módon a membrán hatása nem direktben, hanem indirekt módon, az iontranszferen és a kedvezőbb pH viszonyokon keresztül jelentkezhet az elektro-aktív biofilmhez kötődő tulajdonságokra, köztük az általunk vizsgált redoxfehérje borítottságra vonatkozóan.

Megjegyzés #17: A 45. oldalon értelmezi a 37. ábrán bemutatott, izgalmas számítások eredményeit. A 2. bekezdésben szerepel: „A 37. ábrán belüli bekeretezett betétábra azt mutatja, hogy hol húzható meg a két tartomány határpontja, amelyet nevezhetünk kritikus k_0 értéknek is.” A 37. ábra is eléggé gyenge minőségben, homályosan szerepel a dolgozatban, betűhibás (hatékonyság) aláírással, de így is jól kivehető, hogy nincs benne „bekeretezett betétábra”. A formai hiányosságok ellenére az ábra tudományos üzenete követhető, nem értelemzavaró.

Válasz #17: A hivatkozott ábrából több verzió is készült, sajnos végül a dolgozatba nem a „bekeretezett részt”, mint betétábrát is tartalmazó került be, melyért elnézést kérek. A vonatkozó publikációban (László Koók, Nándor Nemestóthy, Péter Bakonyi, Attila Gölle, Tamás Rózsenszki, Piroska Takács, Alexandra Salekovics, Gopalakrishnan Kumar, Katalin Bélafi-Bakó. *On the efficiency of dual-chamber biocatalytic electrochemical cells applying membrane separators prepared with imidazolium-type ionic liquids containing $[NTf_2]^-$ and $[PF_6]^-$ anions. Chemical Engineering Journal Volume 324, 15 September 2017, Pages 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.022>) megtalálható az ábra eredeti, hivatkozott formájában:*

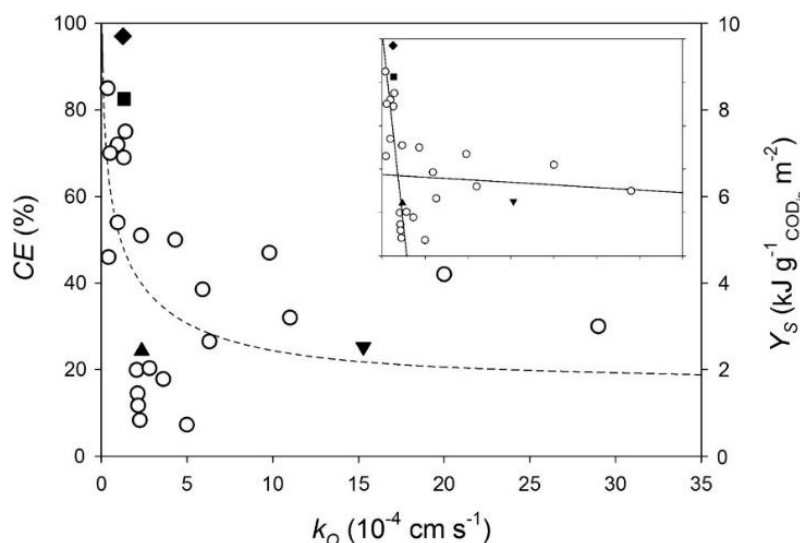


Fig. 4. The relationship of the energy yield (Y_S) and Coulombic efficiency (CE) with oxygen mass transfer coefficient of membranes separators (k_0) employed in MFCs. ($\circ$) CE from literature data (Table 2); Black color symbols display Y_S taken from Table 2. ($\blacklozenge$) [bmim][NTf_2]-SILM; ($\blacksquare$) Nafion N115; ($\blacktriangle$) PVDF; ($\blacktriangledown$) [hmim][PF_6]-SILM.

Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.022>

Kérdés #18: Elfogadva a k_0 és k_A meghatározó szerepét ismét felvetődik a korábban már emlegetett stratégiai kérdés: miért kell nekünk a MÜC alap elrendezés esetében a membránnal elválasztott, 2 térrészes, (egy anaerob anódtér és egy aerob katódtér) ragaszkodni? A MÜC alapkonstrukció helyett a Mikrobiális Elektrolízis Rendszer (MES), más néven Biológiai Elektrokémiai Szintézis (BES) stratégia anaerob és ráadásul víz helyett hasznos terméket

(metán, szerves savak, alkoholok) termelő katódteret alkalmaz. Kérem, indokolja meg a MUC előnyeit annak fényében, hogy saját eredményei szerint a ko kulcsfontosságú, a rendszer hatékonyságát befolyásoló tényező, ami az anaerob katód tér kialakítás esetében szerepét veszti.

Válasz #18: Ahogy Professzor Úr is említi, valóban találhatunk olyan bioelektrokémiai rendszereket, ahol a molekuláris oxigén nem jelent problémát. Ha az üzemanyagcella-típusú megoldások területén maradunk, ilyenek lehetnek a mikrobiális denitrifikációs cellák, ahol a(z alternatív) katód oldali reakció a nitrát ion nitrogén gázzá való, többlépcsős redukciójára épül egy, a katódon felnövesztett, arra alkalmas biofilm, úgynevezett biokatód kialakítása segítségével (A. Vijay, et al. *Denitrification process in microbial fuel cell: A comprehensive review. Bioresource Technology Reports Volume 17, February 2022, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100991>*). Ha átlépünk az úgynevezett mikrobiális elektrohidrogenezis/elektrolízis cellák (MEC) területére, akkor olyan rendszerekkel találkozunk, ahol az anód oldali reakció tulajdonképpen ugyanaz, mint az üzemanyagcella esetében (tehát szerves anyag oxidáció történik), de a katód oldalon arra alkalmas katalizátor (tipikusan platinázott szénpapír) segítségével a hidrogénionok redukciója valósul meg hidrogén gázzá, bizonyos mértékű külső energia befektetés mellett (B.E. Logan, et al. *Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 23, 8630–8640. <https://doi.org/10.1021/es801553z>*). Itt is ismeretesek olyan változatok, ahol a katódon szintén egy elektrokémiai-aktív biofilmet alakítanak ki (biokatód), helyettesítve ezzel az említett kémiai katalizátort (A.W. Jeremiasse, et al. *Microbial electrolysis cell with a microbial biocathode. Bioelectrochemistry Volume 78, Issue 1, April 2010, Pages 39-43. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2009.05.005>*). Érdemes lehet azt is szem előtt tartani, hogy ha és amennyiben az oxigén nem is okoz valós technológiai kihívást egy MEC üzemeltetésében, egyéb gázok membránon keresztüli gázpermeációval itt is kell foglalkozni pl. a katód oldalon termelt H₂ szennyeződése az anód oldalon keletkező CO₂-dal. Friss, 2025-ös publikációjukban koreai kutatók hasonló megfontolások szerint a MEC-ban is alkalmazott membránok gázpermeációs tulajdonságait is egy lényeges, minősítési kritériumnak tekintik (Y. Jung, et al. *PPO-based ion exchange membranes with distinct functional groups for bioelectrochemical systems: A comparative study of sulfonated and quaternized types in MFC and MEC modes. Chemical Engineering Research and Design Volume 221, September 2025, Pages 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.07.049>*).

Ugyanakkor véleményem szerint azt is célszerű látni, hogy a mikrobiális elektrokémiai technológiák területén az oxigénnel kapcsolatos problémakör nem csupán az üzemanyagcellákban jelentkezhet. Az persze egyfelől igaz, hogy a katód tér anaerobra cserélhető és egy így kialakított, potenciosztatikusan kontrollált bioelektro-szintézis cellában értékes komponensek termeltethetők szén-dioxidból és hidrogénből kiindulva, azonban a cella anód oldalán párhuzamosan futó, legtipikusabb reakció a víz oxidációja, melynek termékei között megtaláljuk az oxigén gázt és a H⁺ iont (P. Dessi, et al. *Microbial electrosynthesis: Towards sustainable biorefineries for production of green chemicals from CO₂ emissions. Biotechnology Advances*

Volume 46, January–February 2021, 107675. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107675>). Következésképpen egy (kationcserélő) membránra ezen rendszerekben is szükség van, mely biztosítja a protonfluxust is az anaerob biológiai konverzió előrehaladásához és egyidejűleg visszatartja az oxigént (védve az anaerob katódteret). Ennek tükrében saját eredményeink a membránok ko értékével kapcsolatosan ezen rendszerekben is fontosak lehetnek.

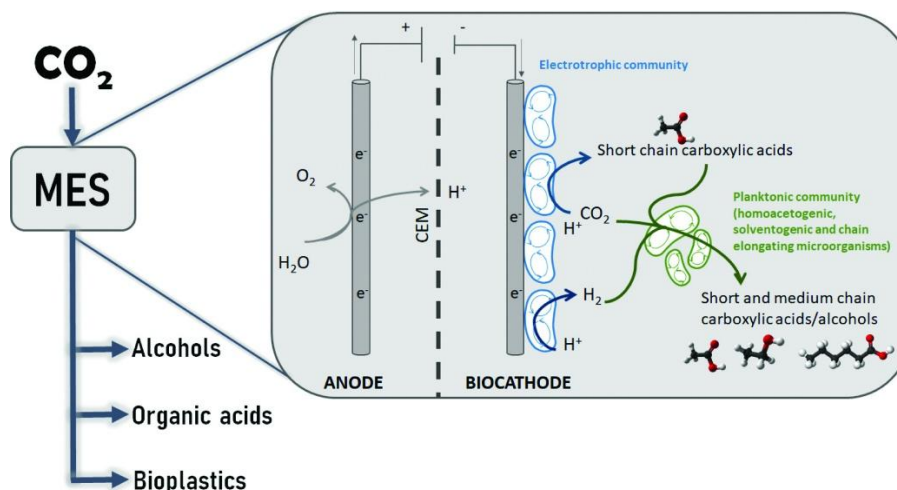


Fig. 1. Schematic representation of a typical MES configuration for biocommodities production from CO₂.

Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107675>

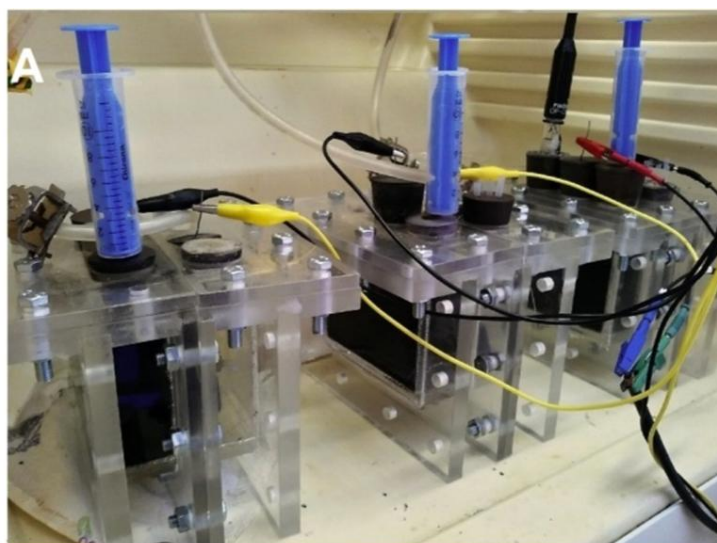
Kérdés #19: A 38. ábrához és annak szöveges értékeléséhez kapcsolódó, magyarázatra szoruló kérdés/megjegyzés: Ez a vizsgálat arra irányult, hogy az ábrán [Bmim][NTF₂], a szövegben [bmim][NTF₂], az ábraalírásban SILM névvel illetett, de valójában ugyanazon kémiai szerkezettel rendelkező támasztóréteges membrán fajlagos energia kihozatal szempontjából hogyan viszonyul a „gold standard” Nafion membránhoz? Az ábra vízszintes tengelyén „CODin (g)” jelölés szerepel. Itt már értelmezési nehézségbe ütközünk, mert a kémiai oxigén igény (COD) egy szervesanyag koncentrációkra vonatkozó mértékegység, amit mg/L egységekben szokás kifejezni. Feltételezve, hogy a hibásan feltüntetett mértékegység az ábrán g/L egységet jelent, az ábrából az olvasható ki, hogy 0,03 g/L (azaz 30 mg/L) szervesanyag koncentráció alatt hatékonyabb a SILM membrán a Nafionnál. Ez előnyös tulajdonságként nehezen összemérhető a szennyvíztisztításban előforduló COD értékekkel, mert a kommunális szennyvíz átlagosan 200-2000 mg/L koncentrációban tartalmaz COD-t és a jól működő szennyvíz tisztítóknak a tisztított és kibocsátott víz szerves anyag koncentrációja esik 10-15 mg/L nagyságrendbe. Mi a relevanciája a SILM egyetlen (!) pontban (30 mg/L?) mért előnyös hatásának a gyakorlat szempontjából?

Válasz #19: A kérdés első részére a válasz igen, a cél az volt, hogy a Nafionnal összevetésben vizsgáljuk a [bmim][NTF₂] ionos folyadék-tartalmú, új típusú membránok alkalmazhatóságát a mikrobiális üzemanyagcella hatékonysága tükrében. A hivatkozott 38. ábrán kémiai oxigén ekvivalensben (COD) került kifejezésre a beadagolt szubsztrát mennyiség, a vízszintes tengelyen tehát abszolút mennyiségek láthatók a 20 mg – 80 mg tartományban. Ha ebből aktuális koncentrációt kívánunk számolni, akkor, figyelembe véve az anódtér munkatér fogatát (60 mL), 333 mg L⁻¹ – 1333 mg L⁻¹ értékek adódnak, melyek pontosan a Professzor Úr által is említett 200-2000 mg COD L⁻¹ tartományba esnek, s amelyek a kommunális szennyvizet általában jellemzik. Így, a SILM előnye lehet, hogy valós szerves anyag terheltségű szennyvizek kezelésében (főként az alacsonyabb koncentráció tartományban) nyújthat alternatívát a Nafionnal szemben.

Kérdés #20: 39. ábrán bemutatott kísérlet értékelésével kapcsolatban ismét felvetődnek a már említett kérdések: a.) Az ábrán szereplő ILM-MFC vajon a [bmim][NTF₂] vagy a szövegben említett [bmim][PF₆] rejtjelének felel meg? b.) Miért nincsenek feltüntetve a szórások az

ábrákon? c.) Mennyire reprodukálhatók ezek az eredmények? Az előző ábrához hasonlóan itt is hiányoznak a szignifikanciát megmutató értékek/adatok.

Válasz #20: (a) A 39. ábrán az ILM-MFC a [bmim][PF₆] ionos folyadékkal készített SILM esetére vonatkozik, arra utalással a 39. ábra felett a dolgozat 47. oldalának tetején. Elnézést kérek, ha ezzel kapcsolatban a megfogalmazás nem volt egyértelmű. (b) A 39. ábrán végül egy, SILM és Nafion membránokkal ellátott mikrobiális üzemanyagcella adatsorainak értékelése történt meg. A párhuzamosok, reprodukálhatóság kérdését természetesen fontosnak tartottuk, indítottunk is eredetileg több cellát a fotodokumentációnak megfelelően, melyet az eredeti, Journal of Membrane Science cikkünkben (<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.063>) is közzeltünk (a fotón aktuálisan három egymás mellett működő mérőcella látható). Azonban sajnos, mint az nem egyszer előfordul, bizonyos cellák működése hibára fut, így végeredményben az adatkiértékeléshez csak kevesebb számú, független cellából származó eredményt tudtunk figyelembe venni.



Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.10.063>

c) Mivel ezt a konkrét kísérletsorozatot nem ismételtük azóta, a reprodukálhatóságról tágabb kontextusban, szakirodalmi adatok, illetve legújabb saját eredményeink alapján nyilatkoznék. Spanyol kutatók nagyszámú, 112 db egyidejűleg indított mikrobiális üzemanyagcellán vizsgálták többek között a reprodukálhatóság kérdését (S. Mateo, et al. *Reproducibility and robustness of microbial fuel cells technology. Journal of Power Sources* Volume 412, 1 February 2019, Pages 640-647. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.007>). A közzelt eredmények alapján elmondható, hogy a szórások az átlagértékekhez mérten viszonylag jelentősek (45-47 %) voltak: $1.73 \pm 0.77 \text{ W m}^{-2}$ maximális teljesítménysűrűség, $14.124 \pm 6.748 \text{ A m}^{-2}$ maximális áramsűrűség. Ennél a saját tapasztalataink jelentősen kedvezőbb képet mutatnak. 2025. évi kutatásunkban három párhuzamosan, azonos körülmények között működtetett mikrobiális üzemanyagcellát vizsgáltunk nemzetközi együttműködésben új típusú, polianilin bevonatos membránt alkalmazva (Szabolcs Szakács, László Koók, Zbynek Pientka, Miroslav Otmar, Jan Zitka, Libuše Brožová, Wojciech Kujawski, Tamás Rózsenszki, Adrienn Fitos-Boros, Ahmed Bahaa, Kyu-Jung Chae, Nándor Nemestóthy, Katalin Bélafi-Bakó, Péter Bakonyi. *Demonstration of a novel, polyaniline film-coated composite membrane as an efficient separator for microbial fuel cells operated in the long-term. Chemical Engineering Journal Advances* Volume 23, August 2025, 100824. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100824>). Az eredmények tükrében elmondható, hogy a szubsztrát (acetát) koncentrációjától (2.5, 5 és 7.5

mM) is függően a maximális áramsűrűségek átlag és hozzátartozó szórás értékei $344.1 \pm 32.3 \text{ mA m}^{-2}$, $406.4 \pm 90.9 \text{ mA m}^{-2}$ és $390.0 \pm 86.6 \text{ mA m}^{-2}$ voltak, 9-22 (átlagosan 17-18) % relatív eltérést indukálva. Ez ugyan magasabb a tisztán kémiai reakciók reprodukálhatósági értékénél (<5 %), de jellemzője lehet a biológiai reakcióknak, amelyek még steady-state körülmények között is képesek nagyobb kilengéseket produkálni és rámutat a statisztikai értékelés fontosságára, melyet a hivatkozott 2025-ös cikkünkben is megtettünk a szükséges adatmennyiség birtokában.

Kérdés #21: A 42. ábra különösen figyelemre méltó összehasonlítást mutat be az egyes membrántípusok teljesítménysűrűségeinek meghatározásával. Eszerint a Nafion és SILM membránok teljesítménye között 2,5-3-szoros különbség mutatkozik a Nafion javára. Ennek tükrében mennyire versenyképesnek tartja a SILM membránokat?

Válasz #21: Köszönöm a kérdést. Azt gondolom, hogy a SILM alkalmazása terén van még lehetőség előre lépni, és alkalmazhatósági korlátok is lehetnek, vagy inkább lehet, hogy érdemes úgy fogalmazni, hogy konkrét (javasolt) alkalmazási területekben célszerű gondolkodni. Ilyen lehet, a kutatási eredményeinkkel összhangban, hogy alacsonyabb szerves anyag-tartalmú anyagáramok, szennyvizek kezelésére teszteljük őket, s próbáljuk meg validálni a labor (egyszerűsített modell) rendszerekben elért eredményeket a Nafionnal összevetésben.

Végezetül még egyszer szeretném megköszönni Dr. Kovács Kornél részletes bírálatát, előremutató észrevételeit és javaslatait, melyeket a jövőben mindinkább igyekszem megfogadni és későbbi munkáim során beépíteni.

Veszprém, 2026. január 19.



Bakonyi Péter