

Válaszok Dr. Janáky Csaba bírálataira

Először is szeretném megköszönni Dr. Janáky Csaba részletes, előremutató és támogató bírálatát. Az évek során Docens Úr – mint az elektrokémiai cellák kialakítása és alkalmazása területének nemzetközileg elismert szakértője – előadásai, munkái több ponton motiválták az általunk végzett kutatásokat is. A Docens Úr által megfogalmazott megjegyzésekre, kritikai észrevételekre, javaslatokra és kérdésekre az alábbiakban reflektálnék.

Megjegyzés #1: Itt jegyzem meg, hogy a „támasztóréteges folyadékmembrán” kifejezés nekem nagyon zavaró, bár látom, hogy a kutatócsoport évek óta ezt a kifejezést használja.

Válasz #1: Való igaz, kutatócsoportunkban hagyományosan az angol nyelvű szakirodalomban használatos „Supported Ionic Liquid Membrane” (SILM) terminológia magyar nyelvű megfelelőjeként a „támasztóréteges folyadékmembrán” került bevezetésre. Egyetértek Opponensemvel abban, hogy a mögöttes műszaki tartalom, vagyis a membrán struktúrája, kialakítása figyelembevétele mellett egyéb elnevezések is adekvátok lehetnek, például a bírálóban megfogalmazott/javasolt „ionos folyadékkal impregnált membrán” avagy „hordozós ionos folyadék membrán”.

Megjegyzés #2: A mérési eredmények grafikai feldolgozása eklektikus. Számos esetben hiányérzet maradt bennem az ábrákat nézve. Értem, hogy ezek már megjelentek közleményekben, és nem feltétlenül várható el ezek egységes formára hozatala az értekezésben. Ugyanakkor sok esetben a jobban átgondolt és ízlésesebb ábrázolásmód segítette volna a befogadást. További kritikai észrevétel, hogy az elektrokémiai impedancia spektroszkópiai eredmények Nyquist-féle ábrázolása során az x és y-tengelyeknek (valós és imaginárius impedancia) egyformának kell lenniük, a megfelelő összehasonlíthatóság érdekében (25. ábra).

Válasz #2: Köszönöm a megjegyzést, a benne megfogalmazott kritikát elfogadom. Az ábrák többsége, ahogy Bírálóm is említi, a már megjelent közleményekből kerültek importálásra az értekezésbe s minőségük, felbontásuk valóban hagy kívánni valót maga után. Mivel jelen helyzetben ezek korrekciójára már nincs mód, a jövőben igyekszem ezen aspektusokra nagyobb figyelemmel lenni. A Nyquist-féle ábrázolás egységesítését érintően Opponensemnek úgyszintén igaza van. A szükséges lépéseket ez irányban meg is tettük, egyik legújabb publikációnkban már izometrikus tengelyek mentén mutattuk be a vonatkozó ábrát (Szabolcs Szakács, László Koók, Zbynek Pientka, Miroslav Otmar, Jan Zitka, Libuše Brožová, Wojciech Kujawski, Tamás Rózsenberszki, 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.ceja.2025.100824>).

Kérdés #3: Mi alapján választotta ki a szerző a kísérletekben alkalmazott membrántípusokat, és hogyan gondoskodott arról, hogy a különböző membránok teljesítményének összehasonlítása objektív legyen (például azonos üzemi feltételek mellett)?

Válasz #3: Ez a felvetés igen lényeges szempontokra tesz utalást. A membrántípusok kiválasztása során szempont volt, hogy a nemzetközi szakirodalmi fősodornak, trendeknek megfelelően ioncserélő (PEM, CEM, AEM) polimereket alkalmazzunk, melyek összességében a mikrobiális üzemanyagcellákban tesztelt membránanyagok nagyságrendileg 70 %-át fedik le (L. Koók, Gy. Dörgő, P. Bakonyi, T. Rózsenberszki, N. Nemestóthy, K. Bélafi-Bakó, J. Abonyi.

Directions of membrane separator development for microbial fuel cells: A retrospective analysis using probabilistic Bayesian classification algorithm and descriptive statistical approach. Journal of Power Sources Volume 478, 1 December 2020, 229014. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229014>). Ezt a munkát jelentősen segítette a Cseh Tudományos Akadémia Makromolekuláris Kémiai Kutatóintézetével való szoros és folytatólagos együttműködésünk, ahol az évek során számos innovatív polimer membránt szintetizáltak változatos elektrokémiai alkalmazásokhoz, például alkalikus víz elektrolízishez (J. Hnát, et al. *Anion-selective materials with 1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane functional groups for advanced alkaline water electrolysis. Electrochimica Acta Volume 248, 10 September 2017, Pages 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.07.165>*). Az általunk vizsgált mikrobiális üzemanyagcellák több esetben egy újszerű, kiterjesztett teszt környezetnek minősültek, s eredményeink fontos visszacsatolásként jelentkeztek az anyagok viselkedésére, hasznosíthatóságára vonatkozóan. Itt érdemesnek érzem hozzátenni, hogy a cseh TailorMem vállalattal (<https://tailormem.com/>) jelenleg is élő, aláírt együttműködési megállapodásunk van ioncserélő membránok vizsgálatára, s bízunk benne, hogy ennek eredményeként ígéretes membrán anyagok fejlesztéséhez, piacra vezetéséhez tudunk hozzájárulni.

A kérdés másik részét illetően – mely lényegében az eredmények összehasonlíthatóságára vonatkozik – fontosnak érzem azzal kezdeni, hogy egy ígéretes membránt is lehet „jól és rosszul” használni. A bioelektrokémiai rendszer tervezése és működtetése egy többváltozós egyenlet (lásd dolgozat 14. oldal, 9. ábra), s a standardizáció hiánya okozza valószínűleg azt, hogy a 2020-as nagyképet tekintve (disszertáció 10. oldalának 7. ábrája) a mikrobiális üzemanyagcellák, a membrán típusától függetlenül átlagban összemérhető (~300 mW m⁻²) teljesítménysűrűségeket produkálnak (L. Koók, Gy. Dörgő, P. Bakonyi, T. Rózsenszki, N. Nemestóthy, K. Bélafi-Bakó, J. Abonyi. *Directions of membrane separator development for microbial fuel cells: A retrospective analysis using probabilistic Bayesian classification algorithm and descriptive statistical approach. Journal of Power Sources Volume 478, 1 December 2020, 229014. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229014>*).

Az eddigiek értelmében a teljesen azonos üzemi feltételek biztosítása az egyes membrános bioelektrokémiai rendszerek vizsgálatára irányuló kísérleteink során nem mindig, nem minden tekintetben (egy jó példa erre az inokulum) tudott teljesülni. Nagy szükség lenne széleskörben átvehető, adaptálható protokollok kidolgozására, azok független laboratóriumok, kutatócsoportok általi validálására (round-robin tesztek), majd standardként (kvázi egyfajta szabványként) történő alkalmazására annak érdekében, hogy amikor bioelektrokémiai rendszerről beszélünk (akár tervezés, akár működtetés tekintetében), akkor ugyanarról beszéljünk és az összehasonlítások (pl. melyik membrán jobb, mint a másik) fair körülmények között, valóban objektív módon is megtörténjenek. Előremutató ebből a szempontból a mikrobiális üzemanyagcella technológia úttörőjeként ismert Bruce Logan vezette kutatócsoport törekvése, akik az amerikai Pennsylvania State University hivatalos honlapján összegyűjtötték és elérhetővé tették részletes leírásokkal, fotómellékletekkel a saját rendszereikre vonatkozó anyagválasztási, cellatervezési és kivitelezési információkat, megfontolásokat (<https://sites.psu.edu/microbialfuelcells/make-one/>).

Kérdés #4: A mikrobiális közösségek elemzésére 16S rRNS génszekvenálást és főkomponens-analízist alkalmaztak. Hogyan ellenőrizte a szerző e módszerek megbízhatóságát (például a PCR okozta torzítások vagy a mintavétel reprezentativitásának szempontjából), és az így kapott eredmények mennyire tekinthetők kvantitatívnak az egyes fajok arányát illetően?

Válasz #4: A mikrobakonzorcium analízisre szánt minták tekintetében célszerű külön tárgyalni az elektród- és membránfelületi minták eseteit. A 3D (téglatest) geometriájú szénfilc anódokról

konzekvensen mindig ugyanazon régióból vágunk le kisebb (összességében az elektród kiterjedésének ~10 %-át kitevő) darabokat, s azok további feldolgozása a rajta kialakult biofilm összetételének meghatározása céljából külsős szolgáltatás keretében történt. Azt, hogy ez a kvázi „egyponti” mintavétel az anód esetében mennyiben lehet reprezentatív (figyelemmel a biofilm – feltételezetten – teljes elektródfelületen történő elhelyezkedésére), mi magunk külön nem ellenőriztük. Amerikai kutatók azonban már a 2010-es évek elején rámutattak, hogy a mikrobiális üzemanyagcellákban használt mind kétdimenziós (síklap), mind pedig háromdimenziós (kefe) geometriájú szén-alapú elektródok esetében az egymástól jól elkülönülő helyekről vett (az alábbiakban A, B, C megjelölésű) pontminták is gyakorlatilag ugyanazon eredményre vezetnek, a mikrobaprofilok között jelentős eltérések nem voltak tapasztalhatók (I.T. Vargas, et al. *Spatial distribution of bacterial communities on volumetric and planar anodes in single-chamber air-cathode microbial fuel cells (Biotechnology and Bioengineering Volume110, Issue11, November 2013, Pages 3059-3062.* <https://doi.org/10.1002/bit.24949>).

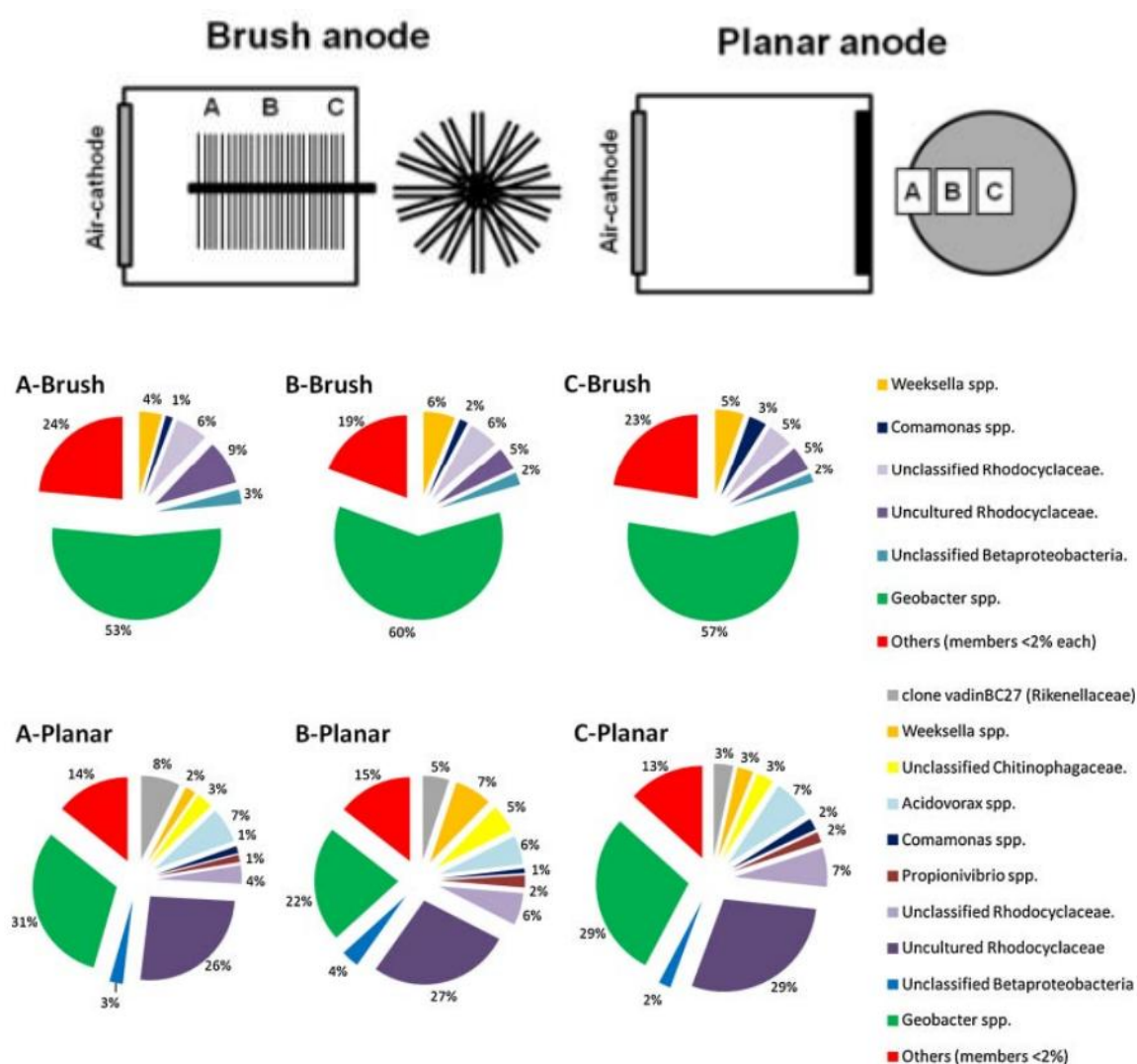


Figure 2. Bacterial community characterizations of brush and planar anodes. Community structures were maintained at different locations for the two types of anodes.

Forrás: <https://doi.org/10.1002/bit.24949>

A membránfelületi minták esetében a kialakult biofilmek (biofouling rétegek) minden esetben a teljes felületről kerültek fizikailag eltávolításra, így a mikrobakonzorcium analízisre szánt minták reprezentativitása biztosított volt. Az ionogél membránnal felszerelt mikrobiális

üzemanyagcella esetében a planáris Pt/C katódon kialakult biofilm a teljes felület mentén eltávolításra és mintaként felhasználásra került, megalapozva így e tekintetben a vonatkozó mikrobakonzorcium analízis eredményének validitását.

A 16S rRNS génszekvenálás teljes folyamatát – beleértve a mintaelőkészítést (DNS kinyerést), PCR reakciót, szekvenálást és az adatok bioinformatikai értékelését (taxonómia) – a helyben szükséges infrastruktúra és tapasztalat hiányában külsős szolgáltatás keretében végeztettük, metodológiájának részleteit a releváns publikációinkban a szolgáltatóval előzetesen egyeztetve közöltük. Az ily módon kapott eredmények pl. molekuláris biológiai standardoknak való megfelelését (beleértve a kérdésben megfogalmazott kihívásokat a PCR reakció kapcsán) mi magunk alapvetően nem ellenőriztük, a szolgáltató által részünkre átadott adatokat (pl. egy MS Excel fájlban a mintákra és taxonokra jellemző leolvasási/beütési (read) számokkal, valamint relatív abundancia értékekkel) használtuk fel az egyes minták többszempontú, főkomponens-analízisen alapú összehasonlításához.

Kérdés #5: A disszertáció eredményei szerint a membrán típusa erősen befolyásolja a MŰC elektrokémiai teljesítményét, ugyanakkor az anódbiofilm összetételét alig változtatja. Miként értelmezi a szerző ezt a látszólagos függetlenséget, és nem lehetséges-e, hogy a membrán hatása csak közvetetten, a biofilm finomszerkezetében jelentkezik (amit a használt vizsgálati módszerekkel nem tudott kimutatni)?

Válasz #5: A membrán hatása a mikrobiális üzemanyagcella hatékonyságára függhet annak típusától (disszertáció 5.1.1. fejezet), pl. anioncserélő membrán alkalmazása segíthet mérsékelni az elektródterek között létrejövő pH gradienst, kompenzálva az anolit savasodását, s így kedvezően hatva az elektrokémiai-aktív biofilm aktivitására. Vizsgálataink szerint ugyan az anódbiofilmek mikrobiális összetétele nem mutatott jelentős függést a membrán típusától (disszertáció 5.1.2. fejezet), az anód redoxfehérje (citokróm) borítottsága a vonatkozó számításaink szerint egy nagyságrenddel nagyobb volt az anioncserélő membrán alkalmazása mellett, mint a proton- és kationcserélő membránnal üzemeltetett rendszerek esetében (disszertáció 5.1.3. fejezet). Természetesen egyetértek Bírálómmal abban, hogy az elektro-aktív biofilm szerkezetének, állapotának további feltérképezése segítheti a membrán – akár többrétű, ion- és/vagy anyagtranszferhez kötött – hatásának megértését. Véleményem szerint például érdemes lehet az elektro-aktív biofilmet konfokális lézer pásztázó mikroszkópiával (CLSM) vizsgálni – mely egy részletes képet ad az anódbiofilm felépüléséről, belső szerkezetéről (megkülönböztetve akár az elhalt és élő mikrobákat tartalmazó rétegeket), vastagságáról (*D. Sun, et al. Temporal-Spatial Changes in Viabilities and Electrochemical Properties of Anode Biofilms. Environ. Sci. Technol. 2015, 49, 5227–5235. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00175>*) – és korreláltatni az eredményeket az alkalmazott membrán típusával, annak tulajdonságaival.

Kérdés #6: A dolgozat bevezette a membrán egy kritikus oxigénáteresztési tényezőjét (k_O) a cellahatékonyság szempontjából. Milyen tényezők befolyásolhatják ezt a kritikus k_O értéket a gyakorlatban, és hogyan lehet ezt az ismeretet felhasználni a membránok tervezésénél a MŰC teljesítményének optimalizálására?

Válasz #6: Bírálóm újfent egy nagyon lényeges aspektusra kérdezett rá. Azonos vastagság mellett a k_O érték a membrán anyagi minőségétől és szerkezetétől, felépítésétől függő tulajdonság, amelyek hatása az oldott oxigén gáz membránon keresztüli diffúziós tényezőjében manifesztálódik. Azt gondolom, hogy a dolgozat egyik fontos konklúziójaként bevezetett kritikus k_O értéknek szerepe lehet mikrobiális üzemanyagcellákban felhasználni tervezett membránok előminősítésében (screening). Fontos azonban, hogy a membránok tulajdonságai

üzemelés során számos tekintetben változhatnak pl. a felületükön kialakuló biológiai eltömődési réteg megjelenése következtében. A dolgozatban bemutatott eredmények (42. oldal 34. ábra) rávilágítanak például, hogy PEM és AEM membránok k_0 értéke jelentősen, 20 %-ot meghaladó mértékben változott mikrobiális üzemanyagcellában való alkalmazást követően, vagyis a használat előtti állapotban meghatározott k_0 érték és annak összevetése a kritikus k_0 értékkel – az előző okfejtéssel összhangban – egy inkább indikatív, előzetes döntést támogató lépésként értelmezhető.

Kérdés #7: A cellulóz-alapú ionogél membrán kísérleteiben a membrán biológiai bontásának jelei mutatkoztak (például a *Clostridium termitidis* megjelenése). Milyen megoldásokat javasol a szerző a membránok ilyen jellegű biológiai lebomlásának megelőzésére, és hogyan befolyásolja ez az eredmény az ionogél membránok gyakorlati alkalmazhatóságát?

Válasz #7: A kérdés első részére vonatkozóan, az ionogél membrán készítésénél az eredeti ötlet az volt, hogy egyidejűleg kihasználjuk az ionos folyadékok cellulóz feldolgozásban (oldásban) betöltött szerepét és (a membrán biológiai eltömődésének visszaszorítására) bizonyítottan antimikrobiális hatásukat (K.M. Docherty, C.F. Kulpa. *Toxicity and antimicrobial activity of imidazolium and pyridinium ionic liquids*. *Green Chem.*, 2005,7, 185-189. <https://doi.org/10.1039/B419172B>). A cellulóz (mennyiségi, akár >10 tömeg%) oldására szakirodalmi adatok alapján elsődlegesen a hidrofil karakterű ionos folyadékok alkalmasak, mely tulajdonságot döntően befolyásol a jelenlévő anion és a kation struktúrája (pl. az imidazólium gyűrűhöz kapcsolódó alkilánc hossza). Ezen alapelvek figyelembevételével a kutatásainkban is megjelenő 1-butil-3-metilimidazólium klorid ([BMIM][Cl], illetve ezen túlmenően az 1-etil-3-metilimidazólium acetát ([EMIM][Ac]) is megfelelő jelöltek, választások lehetnek az ionogél membrán készítésére (R.B. Swatloski, et al. *Dissolution of Cellose with Ionic Liquid*. *J. Am. Chem. Soc.* 2002, 124, 18, 4974-4975. <https://doi.org/10.1021/ja025790m>). Az értekezésben is részletezett tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy az ionogél membrán aktuális [BMIM][Cl] tartalma önmagában nem volt elegendő a biológiai eltömődés visszaszorítására, a membrán felületén jelentős részarányban azonosítottunk cellulóz-bontó *Clostridium termitidis*-t. Nyitott kérdés, hogy az [EMIM][Ac] alkalmazása hozna-e változást e tekintetben. Korábbi, egyéb anaerob (hidrogén) fermentációs rendszerekből származó eredményeink arra világítottak rá, hogy – az ionos folyadék [BMIM]⁺ kationja mellett – az [Ac]⁻ anion a [Cl]⁻ anionnal összevetésben a mikrobák (*Clostridium*-okat is alappal feltételezhetően tartalmazó) közössége által jobban tolerált (Nándor Nemestóthy, Péter Bakonyi, Tamás Rózsenszki, Gopalakrishnan Kumar, László Koók, Gábor Kelemen, Sang-Hyoun Kim, Katalin Bélafi-Bakó. *Assessment via the modified gompertz-model reveals new insights concerning the effects of ionic liquids on biohydrogen production*. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 43, Issue 41, 11 October 2018, Pages 18918-18924. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.174>). Továbbá, egy amerikai kutatók által végzett vizsgálatból az derült ki, hogy *Clostridium* baktériumra specifikusan, [EMIM][Ac] esetén >2.5 g/L koncentráció szükséges szaporodásuk, növekedésük visszaszorításához (Y.V. Nancharai, A.J. Francis. *Alkyl-methylimidazolium ionic liquids affect the growth and fermentative metabolism of Clostridium sp.* *Bioresource Technology* Volume 102, Issue 11, June 2011, Pages 6573-6578. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.042>).

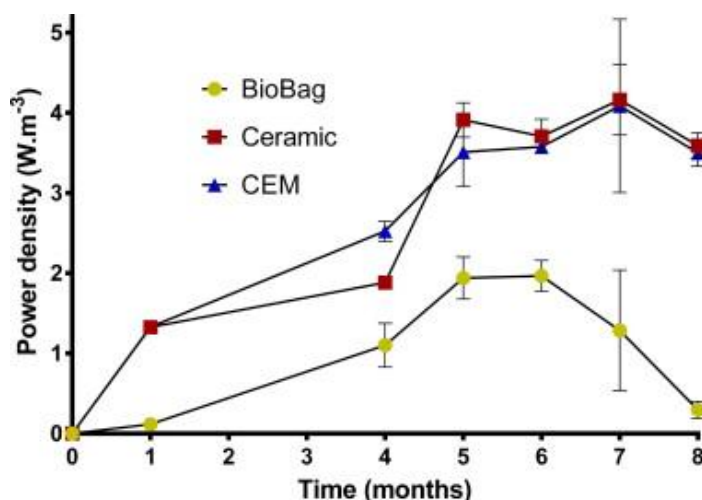
Összességében ezen eredmények arra engednek következtetni, hogy habár az ionos folyadékokra visszavezethető antimikrobiális hatások nagyban függhetnek a választott tesztrendszerrel (szuszpendált vs. rögzített sejtes), nem kizárt, hogy az ionogél membránban visszamaradó ionos folyadék mennyiségének növelésével – a membrán szintézis ilyen irányú finomításával – elérhető olyan koncentráció, amely már gátat szab a nem kívánatos, cellulóz-bontó mikrobiális aktivitásnak. Egy alternatív lehetőségként az ionogél membrán integritásának

fenntartása irányában azt gondolom, hogy érdemes lenne megvizsgálni egyéb kémiai ágensek membrán szintézis folyamatába való bevonásának hatását, a szakirodalomban ígéretes példákat látunk „anti-biofouling” membránok készítésére ezüst nanorészecskék membrán anyagába való ágyazásával (S.G. Park, et al. Long-term effects of anti-biofouling proton exchange membrane using silver nanoparticles and polydopamine on the performance of microbial electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 46, Issue 20, 19 March 2021, Pages 11345-11356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.059>).

A kérdés második részére vonatkozóan, amely a gyakorlati alkalmazhatóságot érinti, elmondható, hogy a disszertáció benyújtása óta eltelt időben (~ 1 év) a munka nem állt meg, s sikerült lépéseket tennünk az ionogél membránok továbbfejlesztése irányába. Míg az eredeti, dolgozatban is bemutatott koncepcióban az ionogél membrán stabilizálásához egy poliétterszulfon háló, mint fizikai támasztó/erősítő réteg került felhasználásra, és a membrán végeredményben 1 mm vastagsággal készült el, előkísérleti fázisban lévő eredményeink szerint aktív szénpor adagolásával az ionogél membrán mechanikai stabilitása jelentősen növelhető (a fizikai támasztóréteg tulajdonképpen elhagyható) és az így készített membrán a polimer membránoknál megszokott, 100-200 mikron vastagsággal előállítható.

Kérdés #8: Az új fejlesztésű membránok (ionos folyadékkal impregnált SILM és ionogél) laboratóriumi körülmények között ígéretesnek bizonyultak. Milyen további kísérleteket vagy tartóteszteket tart szükségesnek annak igazolására, hogy ezek a membránok hosszú távon is stabilak és nagyobb léptékben, ipari környezetben is megbízhatóan működnek?

Válasz #8: Egyetértek Bírálómmal, az ionos folyadékkal készült membránok stabilitása kiemelt jelentőségű. A szakirodalomban és saját kutatásainkban is jellemző, hogy a rövidtávú stabilitás tesztek, vagyis az első visszajelzések egy adott cellakomponens, pl. új-típusú membrán megfelelőségével kapcsolatban néhány hetes, 1-2 hónapos időskálán kerülnek tesztelésre. Ezeket, amennyiben pozitív eredménnyel zárulnak, célszerű kiterjeszteni hosszabbtávú üzemelésre, melyek minimálisan néhány további hónapot, de akár egy évet is felölelhetnek. Érdekes e tekintetben például brit kutatók munkája, akik nyolc hónapos kísérletsorozatban értékelték, többek között biodegradálható műanyag zacskó (BioBag) membránként való alkalmazhatóságát mikrobiális üzemanyagcellában (J. Winfield, et al. Comparing the short and long term stability of biodegradable, ceramic and cation exchange membranes in microbial fuel cells. *Bioresource Technology* Volume 148, November 2013, Pages 480-486. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.163>).

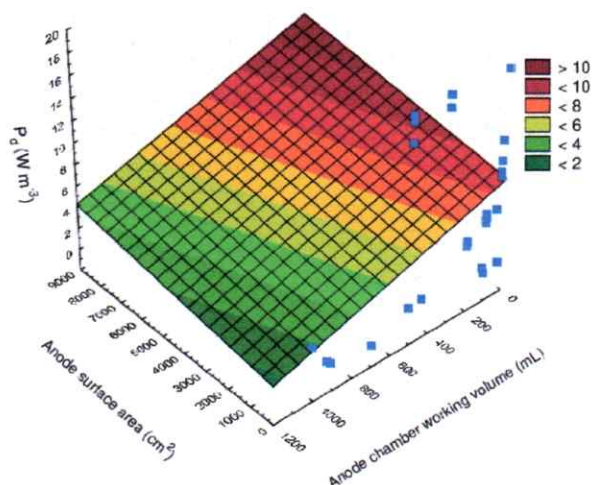
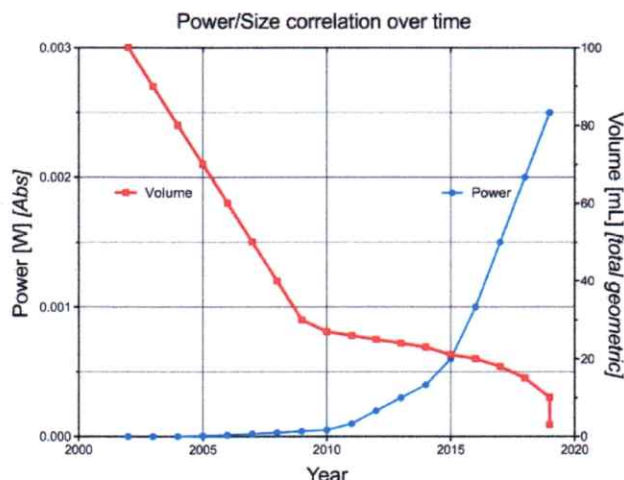


Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.163>

Az eredmények szerint a BioBag membrán élettartama relatíve korlátozott volt a kerámia és kationcserélő membránokhoz képest, valamint a maximális volumetrikus teljesítménysűrűségek is ~ 50 %-kal alacsonyabbak voltak a másik két rendszerhez mérten. Ennek ellenére általánosságban az a véleményem, hogy az olyan anyagok membránként való alkalmazása, melyek olcsók és idővel le is bomlanak (tehát nincs a használatukhoz kapcsolódó hulladékkezelési igény), összességében versenyképesnek is tekinthetők. Ezen megfontolásokat kiterjesztetten érvényesnek tartom az ionogél membrán esetére is. Bár stabilitása – jelen állapot szerint – elmarad más membránokétól és Nafionhoz mérten alacsonyabb áramsűrűséget is sikerült vele elérni a disszertációban bemutatott eredmények tanulsága szerint, az erre irányuló (egyenlőre „házon belüli”, nem publikált) tapasztalataink azt mutatják, hogy a cellulóz-tartalmú ionogél visszaforgatható, megfelelő arányban ionos folyadékkal elegyítve oldott formába vihető, s abból a leírt fázisinverziós módszerrel ismét ionogél készíthető, kialakítva így egy hulladékszegényebb módszert a membránszintézisre. Az ionos folyadékkal impregnált SILM esetében azt gondolom, hogy azok pl. biológiai eltömődése tekintetében van még további vizsgálandó kérdés, amely a stabilitás megítéléséhez elengedhetetlen. A laborkörülményektől ellépve azt gondolom, hogy a membránok rövid- és hosszútávú tesztelésének adekvát ipari környezetet jelenthet (pl. a Veszprémben rendelkezésre is álló) tejipar, hiszen a tejipari szennyvizek számos biodegradálható, mikrobiális üzemanyagcellákban potenciálisan hasznosítható komponenst (maradék szénhidrátot, fehérjét, zsírt) tartalmaznak.

Kérdés #9: Milyen kihívásokat lát a disszertáció eredményeinek gyakorlati alkalmazásában – például valódi szennyvíz kezelésekor vagy nagyobb reaktorokban –, és milyen adaptációkra lehet szükség ahhoz, hogy a laboratóriumi eredmények ipari környezetben is hasznosíthatók legyenek a szennyvízkezelésben?

Válasz #9: Kapcsolódva az előző kérdéshez/válaszhoz, a membránok mikrobiális üzemanyagcellákban mutatott stabilitása, hosszú távú viselkedése, ezek értékelése valós, ipari anyagáramokon mindenképpen szükséges a disszertációban bemutatott eredmények gyakorlatba átültetéséhez. A laborkörülményektől és az egyszerűbb, könnyen metabolizálható szubsztrátoktól (acetát) ellépve pl. a tejipari (vagy akár egyéb lakossági eredetű) szennyvíz hasznosítása irányában mindenképpen azt gondolom, hogy kihívásként jelenik meg a vizes fázistól elkülönülő, pl. zsír frakció hasznosítása. A problémakörrel a szakirodalomban összefoglalóan FOG (Fat, Oil, Grease) címszó alatt találkozunk és kulcskérdés, hogy miként sikerül a mikrobiológiát, az elektro-aktív mikrobákat, azok közösségét adaptálni ezen típusú szubsztrátokhoz. Szükséges feltételnek látszik, hogy a cellában aktívan dolgozó mikrobiom in-situ képes legyen felületaktív anyagok (pl. rhamnolipid) termelésére, amelyek emulzifikáló hatásuk révén képesek kapcsolatot teremteni az eredetileg elszeparálódó vizes-zsíros fázisok között, elősegítve így az anyag- és töltéstranszfer folyamatokat. A „nagyobb reaktorok” kérdéskör kapcsán az rajzolódik ki, hogy mikrobiális üzemanyagcelláknál a „méret növelése” helyett inkább „méret csökkentése” lehet célszerű. Brit kutatók friss, 2025-ben publikált, 2000 utáni historikus adatokon nyugvó elemzésének eredménye látható az alábbi ábrán (I.A. Ieropoulos, D.Z. Moreno. *Microbial fuel cells powering robots and beyond; historical perspective and future directions. Bioelectrochemistry Volume 166, December 2025, 109010. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2025.109010>*). Ennek tanulsága, hogy kisebb térfogatú rendszerek nagyobb teljesítmény leadására képesek. A kisebb (munka)térfogat előnyei visszavezethetők az így kialakuló nagyobb elektródfelület/térfogat arány kialakulására, amely korábbi, szakirodalmi adatokra épülő saját analízisünk szerint is egy lényeges tényező a teljesítménysűrűség növelése érdekében (László Koók, Nándor Nemestóthy, Katalin Bélafi-Bakó, Péter Bakonyi. *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>*).



Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2025.109010> és <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.084>

A hivatkozott eredmények előrevetítik, hogy mikrobiális üzemanyagcellák felskálázása során elsősorban a cellaköteg (stack) kialakításban érdemes gondolkodni, egybevágóan a disszertáció 8. fejezetében („Kitekintés, lehetséges fejlesztési irányok”) megfogalmazottakkal.

Kérdés #10: A bemutatott kísérletekben a tipikus áramsűrűség néhány 100 mA/m^2 . Ez az érték a H_2 -es tüzelőanyagcellák esetében $1\text{--}2 \text{ A/cm}^2$, azaz $10000\text{--}20000 \text{ A/m}^2$. Ez öt nagyságrenddel nagyobb érték. Véleménye szerint mi az a tényező, ami mégis versenyképessé teheti ezeket a bioelektrokémiai cellákat?

Válasz #10: A mikrobiális üzemanyagcellák koncepciójában természetesen fontos az Opponensem által is kiemelt áramsűrűség. A bioelektrokémiai rendszer hatékonyságának jellemzését ugyanakkor véleményem szerint több paraméter együttes figyelembevételével célszerű megtenni, ahol az áramsűrűség mellett legalább olyan hangsúlyos elemként jelenik meg a szennyvíztisztító funkció. Még ha az elért áramsűrűségek szignifikánsan el is maradnak az abiotikus (pl. H_2 -es) tüzelőanyagcellákétól, a rendszer környezetvédelmi és körforgásos gazdasági szempontoknak megfelelő jellemzői (például, hogy a szennyvízre, mint erőforrásra támaszkodik) indokolhatja versenyképességüket és további fejlesztésük szükségességét, melynek keretében egy-két nagyságrendnyi növekedés az áramsűrűség értékekben (megérkezve így az 1 A/m^2 - néhány 10 A/m^2 tartományba) mindenképpen reálisnak tűnik (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>)

Végezetül még egyszer szeretném megköszönni Dr. Janáky Csaba részletes bírálatát, segítő szándékú észrevételeit és javaslatait, melyeket igyekszem jövőbeli munkáim során beépíteni.

Veszprém, 2026. január 19.


Bakonyi Péter