



Szegedi Tudományegyetem
Biotechnológiai és Mikrobiológiai Tanszék
Dr. Kovács L. Kornél Professor Emeritus
6726 Szeged, Közép fasor 52.
Tel: (62) 546 930, Fax: (62) 544 352
E-mail: kovacs.kornel@bio.u-szeged.hu

Bírálóí vélemény

Bakonyi Péter

**„Mikrobiális üzemanyag cellák vizsgálata a membránok perspektívájából”
című akadémiai doktori értekezéséről**

Az MTA doktori értekezések értékelési módszertana szerint az MTA illetékes bizottságai és Doktori Tanácsa előzetesen megvizsgálja, hogy a Jelölt korábbi tudományos tevékenysége alkalmas-e arra, hogy a munkásságát összefoglaló értekezést nyilvános vitára lehessen bocsátani. Bakonyi Péter nyilvánvalóan átesett ezen a procedúrán és megfelelőnek találtatott az MTA Doktora cím elnyerésére benyújtott kérelme alapján. A követelmények számszerű teljesítése az MTMT kimutatása alapján messzemenően teljesült. A Jelölt 125 tudományos közleményben társ, vagy vezető szerző, ezek zöme (102) külföldi, idegen nyelvű publikáció, amelyekre 4200 hivatkozással reagált a nemzetközi tudományos közösség. Hirsh indexe is jelentős, 38. A kémiai tudományok művelői közismerten nagyon termékeny szerzők, de még ebben a mezőnyben is kiemelkedő teljesítménynek számít Bakonyi Péter munkássága. A számok azt tükrözik, hogy a Jelölt és értekezése nyilvános vitára kiválóan alkalmas, magas szintű elismerésre méltó, élenjáró kutatói tevékenységet tükröz.

A dolgozat formai szempontból megfelelő, 93 oldalon foglalja össze a több évtizedes munka szakmai gyümölcseit. Megfogalmazása még a magam fajta mikrobiológus/biotechnológus számára is zömmel könnyen követhető, következtetései logikusak, szabatosak és mértéktartók. 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.

Az értekezés a hagyományos szerkezetet követi. A rövid Bevezetés elhelyezi a témát az utóbbi 2-2,5 évtizedben rendkívül gyors fejlődésnek indult nemzetközi K+F tudományos környezetben, már itt is felvillantva a kutatások környezettechnológiában (szerves hulladék és szennyvízkezelés) és megújuló energiatermelésben megvalósuló gyakorlati potenciálját.

A részletes szakmai értékelés kifejtése előtt egy vallomással tartozom. Én előképzettségemnek megfelelően elsősorban mikrobiológus/biotechnológus szemmel olvastam ezt a dolgozatot. A veszprémi „membrános csapat”, a Bélafiné Bakó Katalin, Nemestóthy Nándor és Gubicza László nevével fémjelzett kutató csoport munkáját évtizedek óta figyelemmel kísérem, időnként sikeres együttműködést is sikerült összehoznunk a membrántechnika és biotechnológia átfedő határmezsgyéjén. Ezért fogadtam el a megtisztelő felkérést Bakonyi Péter MTA Doktori Értekezésének bírálataira/értékelésére. A dolgozatot kézbe véve ismertem fel az egyébként várható tény, hogy ez a munka elsősorban elektrokémiáról, annak is egy jól körülhatárolt problémaköréről szól és kevésbé az engem igazából érdeklő, az elektrokémia és biotechnológia határán mozgó K+F kutatásokhoz szervesen kapcsolódó mikrobiális eseményekről. A dolgozat címében is említett „membrán perspektíva” a membránokon kialakuló elektrokémiai történések sorozatát igyekszik megérteni, ami kétségtelenül nagyon izgalmas és fontos kutatási terület. Kutatócsoportunk viszont a membránokon és elektród felületeken kialakuló és a rendszer hatékonyságát szintén alapvetően meghatározó mikrobiális biofilmek vizsgálatában rendelkezik tapasztalatokkal, ismeretekkel. A téma komplex kezelése interdiszciplináris, határterületi kutatás jellegű feladat. Sokat tanultam a dolgozat feldolgozása és korábbi, veszprémi kollégákkal való eszmecseréink során. Számomra komoly kihívást jelentene részleteiben megítélni a „másik oldal”

(elektrokémia) munkáját. Ebben elsősorban a releváns, hozzáértő nemzetközi kutatói közösségeknek bemutatott cikkekre, eredményekre támaszkodom. A munka elektrokémiai részét én „kiválóan elfogadott”-ként értékelem.

A 14 oldalas Szakirodalmi áttekintés fejezet összefoglalja a „klasszikus” mikrobiális üzemanyag cellákról (MÜC) fejben tartandó fontosabb tudásanyagot. Egy 1911-ben nem sok érdeklődést kiváltó megfigyelést Bruce Logan fedezett fel újra a 2000-es években. Ennek lényege, hogy bizonyos (ma már tudjuk, hogy egyre több) mikrobaféleségek a szerves anyagok anaerob lebontása, fermentációja során elektronokat képesek kibocsátani a környezetükbe. Ezeket az elektronokat alkalmas berendezésben kialakított elektródokkal össze tudjuk gyűjteni és elektromos áramként hasznosíthatjuk. 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. Ez különösen hangsúlyossá válik akkor, amikor az eredeti, steril kultúrákat tanulmányozó, Logan-féle mikrobiális üzemanyag cellák helyett a valós, potenciális gyakorlati alkalmazhatóság felé mutató kevert mikroba közösségeket munkára fogó MÜC kutatás-fejlesztése a cél. Dicséretes, hogy Bakonyi Péter és csapata az ilyen, komplex mikrobiológiai problémákat felvető, kevert anaerob, anód térbeli mikroba rendszerek vizsgálatát tűzte ki a mikrobiológiai szempontból sokkal egyszerűbb, de gyakorlati hasznosításban nagyságrendekkel költségeseb steril kultúrákat használó elrendezésekkel szemben.

A Logan-féle MÜC koncepciónak igen érzékeny, gyenge pontja az aerob katód tér. Az aerob körülmények biztosítása érdekében folyamatosan oxigént kell a katód térbe juttatni, ami energia igényes. Ráadásul az anaerob anód és aerob katód tereket olyan membránnal kell elválasztani, amelyik a protonáramlást biztosítja, de az

oxigént nem engedi az anódtérbe átjutni. A dolgozatban ismertetett kutatás fő iránya éppen az ilyen, hatékony elválasztó membránok kifejlesztése és jellemzése.

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 szén-dioxidból metánt állíthatunk elő a mikrobiális elektrolízis cellában (MEC), vagy egyéb termékeket a hasonló elven működő mikrobiális elektroszintézis (MES) rendszerekben. Ezek ugyan termodinamikailag nem kedvező reakciók, ezért és a veszteségek miatt némi addicionális energia befektetést igényelnek, de megoldják az oxigén problémát és alkalmasan megválasztott konstrukcióban a két térrészt elválasztó membrán is elhagyható. Ráadásul a katódtérben víz helyett értékes megújuló energiahordozó metánt állítunk elő. Nekem bizonyára azért hiányzott a MEC/MES megoldások bemutatása, mert mi éppen ilyen rendszereket kutatunk. Szubjektív véleményem szerint nem lett volna haszontalan az ilyen kutatások bemutatása az olvasó látókörének szélesítése érdekében, bár az utóbbi 15 évben 5-6-szor annyi publikáció látott napvilágot MÜC, mint MES témában. Tehát Bakonyi Péter témaválasztása ma is nagyon időszerűnek mondható.

Az értekezés fő témája a MÜC rendszerekben használt, elválasztó membránok fejlesztése. A kutatás alapvető dilemmája, hogy egyrészt olyan, az anód és katód térrészeket elválasztó membránokat igyekeznek kifejleszteni, amelyeken nem, vagy kevésbé alakul ki az elektrokémiai folyamatokat hátrányosan befolyásoló (belső ellenállást növelő, proton átadási hatásfokot csökkentő) biofilm a kevert mikroba közösségekből (pl. szennyvíz iszap). Másrészt, ezzel ellentétes cél, hogy az anód felületén az anóddal minél hatékonyabb áram termelést biztosító mikrobiális biofilm képződését és fenntartható működését segítse elő. Tehát egyszerre, ugyanazon térrészben és ugyanazon mikroba közösségből kétféle, ellentétes „érdekeket” szolgáló biofilm rendszer kiépítése illetve eliminálása és a rendszer hatékony működtetése a cél. A kihívás összetett. A nemzetközi K+F irodalomban intenzíven kutatott területen jelent véleményem szerint komoly tudományos hozzájárulást Bakonyi Péter munkássága.

Az érdemi, szakmai részleteket illetően a dolgozat felépítését követve foglalom össze a megjegyzéseimet az alábbiakban.

A **2.3.2. Exoelektrogén mikroorganizmusok.** c. fejezetben általánosságban bemutatja az exoelektrogén mikroorganizmusokat, a direkt és indirekt elektrontranszfer folyamatokat.

Megjegyzésem: 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 mikrobák aránya, de a mai molekuláris biológiai 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.

A **2.3.3. Membránok.** c. fejezetben beszámol egy – zömmel saját – átfogó szakirodalmi fejlesztési irányokat összehasonlító, alapos, releváns munkáról. Ez a hivatkozások számából ítélve a szakterület hézagpótló forrás műve lett. Egyetértek következtetésével, ami szerint „... nincs még meg az a membrán (típus), mellyel (egyértelműen) magasabb teljesítménysűrűség értékek lennének elérhetőek (a Nafion membránokkal és egymással való összevetésben)”...

Kérdéseim:

- 1.) 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?
- 2.) 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?

A **2.3.5. Membrán fejlesztési irányok.** c. fejezetben bemutatott 10. ábrán összefoglalja a MÜC 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.

Kérdésem: a „Biotikus” irányba nem lát/javasol fejlesztési lehetőségeket?

Ezért van további fejlesztést nem igénylő zsákutcaként feltüntetve az ábrán?

A támasztóréteges folyadékmembránok (supported ionic liquid membrane, SILM) bevezetése a MÜC két térrészét elválasztó membrán családok közé véleményem szerint a dolgozat egyik, talán legfontosabb innovatív eredménye. Növényi, lignocellulóz vagy tisztított cellulóz alapanyagba épített ionos liquid komponensek hatásmechanizmusa és főleg fenntartható működése azonban fontos kérdéseket vet fel, amelyeket figyelembe kell venni. Erre az 5.4. fejezetnél még visszatérünk.

4.3. Mikrobiális üzemanyag cellák kialakítása. c. fejezet.

Ez a fejezet számomra egy kicsit felületesen írja le a kísérleti rendszer „hardware” elemeit.

Kérdéseim:

- 1.) 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?
- 2.) A MÜC fejlesztés szempontjából elvi problémát jelent, hogy a vizsgált rendszerekben szakaszos szubsztrát betáplálást alkalmaztak (23. ábra). A fenntartható, kiegyensúlyozott működés folyamatos szubsztrát betáplálást és ezzel összefüggésben folyamatos áram termelést igényelne. A folyamatos üzemű elrendezés a mikrobiális biofilmek működésének dinamikáját, funkcionális aktivitását is stabilizálja. Tudom, hogy a MÜC irodalomban elterjedt módszer a szakaszos betáplálás, ami nyilvánvalóan nem optimális a

mikroba közösség kiegyensúlyozott élete szempontjából. Az egyes ciklusok végére a mikrobák majdnem éhen pusztulnak mire megkapják a következő szubsztrát/táplálék adagot.

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

- 3.) Közismert, hogy az első kísérletek nyomán a MÜC rendszerek „táplálására” elsősorban acetátot használnak világszerte a K+F laborokban. Ez összehasonlítható és reprodukálható szubsztrát bevitt 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?

4.5. Mikrobakonzorcium analízis. c. fejezettel kapcsolatos

Megjegyzésem: 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.

Kérdésem: A dolgozatban bemutatott összes mikrobiom analízis vizsgálatot azonos metodikával végezték?

5.1.1. Cellahatékonysági aspektusok c. fejezet:

A bemutatott kísérleti eredmények meggyőzően bizonyítják az alkalmazott rendszerben az anioncserélő (PSEBS DABCO AEM) membrán szerepét az alkalmazott MÜC rendszerben. Ez a dolgozatban bemutatott munka egyik kiemelkedően fontos eredménye. Kár, hogy az olvasó tájékozódását nem segíti a különböző membrán típusok eltérő elnevezése a szövegben és az ábrákon. Némi kutakodás után ki lehet találni, hogy a szövegben tárgyalt membrán típushoz, például a PSEBS DABCO AEM-hez az AEM-MFC görbe tartozik az ábrákon, de jó lett volna

egységesíteni a nevezéktant ugyanúgy, mint a színes és fekete-fehér ábrák összekíváncosozó színvilágát. A 27. ábra bal alsó sarkában meghúzóódó, magyarázat nélküli, feleslegesnek tűnő B betűnek zavaróan semmi köze sincs a 26. ábra bal felső sarkában mutatkozó A,B,C jelölésekhez.

Kérdésem: 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.

5.1.2. Mikrobiológiai aspektusok az anódon kvalitatív szemmel. c. fejezet.

Ez a fejezet a dolgozat egyik legkevesebb alapossággal kidolgozott része. Kicsit szomorúan vettem tudomásul, mert engem főként ezek az eredmények érdekeltek volna. Magyarázat, de nem mentség lehet, hogy a minták szekvenálását külső vállalkozó végezte. Az eredmények alapján feltételezhető, hogy a minta előkészítés és/vagy a szekvenálás nem kiemelkedő minőségben készült. Az adatokból két következtetést lehetett levonni. Az egyik szerint a 30 napos MÜC üzemeltetés végén az anód felszínén és a folyadék fázisban (anolit) a mikrobiom összetétele eltérő volt és mindkét minta csoport összetétele eltért az inokulumként használt szennyvíz iszap mikrobiomjától. A másik szembeötlő megfigyelés az exoelektrogén *Geobacter* nemzetség képviselőinek feldúsulása az anód felszínén. Mindkét megfigyelést a szakmai irodalom régen (20-25 éve) leírta. Az inokulumban az ampliton 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.

Kérdéseim:

- 1.) A 4.1. Vizsgált membránok c. fejezetben felsorolt membrán típusok (AN-VPA CEM, PSEBS SU CEM, PSEBS DABCO AEM, AMHPES, AMPP, CMHPES,

CMHPP, Nafion) közül melyek voltak az 5.1.1. fejezetben leírt, a későbbi mikrobiom vizsgálatra kiválasztott membránok és a többiek miért estek ki a vizsgálatból? Segített volna a többféle elnevezés útvesztőjében egy rövidítések jegyzéke a dolgozat elején vagy szótár beiktatása az egyes, eltérő nevezéktant használó fejezeteknél.

Megjegyzem, hogy a mikrobiológiai nevezéktan sem mindig egyértelmű, és a taxonok elnevezése időnként változik, de egy mikrobának (mikroba csoportnak) mindig csak egyetlen neve van. A *Geobacter* nemzetséget a *Desulfuromonadales* és a *Geobacterales* rendekben is megtalálhatjuk. Ezekből a hiányos szekvencia adatokból azonban egészen biztosan nem lehet fajszintű azonosítást végezni, ezért a „...*Geobacter anodireducens*-t sikerült felszaporítani (szelektálni) az anódfelületen.” állítást barokkos túlzásnak kell tekinteni.

- 2.) 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?

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. Nagyon frappáns felismerésnek tekintem, hogy a ciklikus voltammetria segítségével a „mennyi van ott aktív állapotban” kérdésre is értékes adatot tudott meghatározni. 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.

Kérdésem: 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?

5.2. PSEBS DABCO AEM és Nafion 115 PEM membránok vizsgálatának kiterjesztése c. fejezet lényegében azt vizsgálja, hogy mi történik, ha az irodalomban szintén „gold standard”-ként tekintett 5 mM acetát koncentrációt megemelik? A kísérlet azt találta, hogy a fermentáció általános kinetikáját leíró Monod törvényszerűségnek megfelelően az 5 mM acetát koncentráció mellett már a szubsztrát telítettség állapotába kerül a rendszer, további szubsztrát adagolás nem növeli a biokonverzió hatékonyságát. A túladagolt szubsztrátot már nem képes azonos hatékonysággal átalakítani, amit a ciklusidő meghosszabbodása és a konverziós hatásfok csökkenése jelez (32. ábra). Ebben a kísérletben igazán érdekes és fontos megfigyelésnek tartom, hogy az AEM-MFC minden szinten felülmúlja a standard PEM-MFC, alias Nafion 115 PEM, értékeit. A különbségek elsősorban a diffúziós ellenállásra vezethetők vissza. Ez kapcsolatba hozható az oxigén átadási tényező, ionvezetés, ioncsere kapacitás, vastagság paraméterek változásaival. Fontosnak tartom azt a felismerést, hogy a változások mögött nagy valószínűséggel a membránokon kialakuló biofilm réteg a felelős (33. ábra). A membránokon kialakuló mikrobiális biofilm réteg, annak összetétele („ki van ott”) és funkcionális állapota („mit csinál”) limitálja a további hatékonyság, méretnövelés és működési időtartam határait.

Bakonyi Péter tősgyökeres elektrokémikusként ilyen szemüvegen keresztül tanulmányozta a komplex rendszert és nagyon értékes megfigyeléseiből innovatív és hasznos következtetéseket vont le. Ebben tökéletesen egyetértek az én mikrobiológus szemüveggel szemlélve az eseményeket.

Ezeket foglalja össze az **5.2.1. Membrán tulajdonságok fontosságának értékelése** c. fejezetben. Ez már szintiszta elektrokémiai okfejtés, aminek számomra kiolvasható lényeges üzenete az, hogy a MÜC hatékonyságát elsősorban két paraméter, az oxigén átadási (=keveredési, = crossover) k_o tényező és szubsztrát átadási k_A tényező határozza meg. Ez eléggé logikusan hangzó következtetés, amit ismét új, fontos tudományos eredményként fogadhatunk el.

Megjegyzésem: 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_o értéknek is.” A 37. ábra is eléggé gyenge minőségben, homályosan szerepel a dolgozatban, betűhibás (hatákonyság) aláírással, de így is jól kivehető, hogy nincs benne „bekeretezett betétábra”. A formai hiányosságok ellenére az ábra tudományos üzenete követhető, nem értelemzavaró.

Kérdéseim.

- 1.) Elfogadva a k_o 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 katódtérrel alkalmaz. Kérem, indokolja meg a MÜC előnyeit annak fényében, hogy saját eredményei szerint a k_o kulcsfontosságú, a rendszer hatékonyságát befolyásoló tényező, ami az anaerob katód tér kialakítás esetében szerepét veszti.
- 2.) A 38. ábrához és annak szöveges értékeléséhez kapcsolódó, magyarázatra szoruló kérdés/megjegyzés: Ez a vizsgálat arra irányult, hogy az ábrán $[Bmim][NTF_2]$, a szövegben $[bmim][NTF_2]$, az ábraaláírásban 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 „COD_{in} (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 tisztítóknál 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?

3.) A 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.

4.) 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?

A felsorolt kérdések és bizonytalanságok mellett is megállapítható, hogy a támasztóréteges membránok alkalmazásának bevezetése a MÜC membrán portfólióba kiemelkedően figyelemre méltó és innovatív ötlet Bakonyi Péter munkásságában akkor is, ha további alapos vizsgálatra, jellemzésre szorul.

5.4. Támasztóréteges, cellulóz-[BMIM][Cl] ionogél membrán jellemzése és alkalmazása MÜC-ben. c. fejezet az előzőtől abban különbözik, hogy megkísérelték a szintetikus polimer mátrixot biológiai eredetű polimerrel helyettesíteni. Ez az ötlet is új, innovatív gondolat, hiszen a poliéterszulfon (PES) támasztóréteg háló biztosítja a cellulóz és ionos folyadék keverék mechanikai szilárdságát. A cellulóz mátrix biológiailag könnyen lebomló, tehát környezetbarát alternatívát kínál a jövőben várható, nagy mennyiségben használt MÜC elválasztó membránok részben karbon semleges gyártása számára. Az ötlet tehát dicséretes, tudomásom szerint új és eredeti elgondolás. Ráadásul a veszprémi membránkutató csapat egyik kedvelt témáját és erősségét, az ionogél, az ionos folyadékkal feltöltött, biopolimer membránokat hozta a MÜC kutatás reflektor fényébe. A cellulóz alapú ionogél membrán egy kicsit gyengébben teljesített az áramsűrűségi (45. ábra) és

hatékonysági (46. ábra) mutatók tekintetében a „gold standard” Nafionnál de a végső összevetésben ezt ellensúlyozhatja a mátrix környezetbarát jellege. Azonban ebben a kísérleti szakaszban mutatkozik meg feltűnően, hogy szükség lett volna némi mikrobiológiai szakértelemre a kísérletek tervezésekor és kivitelezésekor. Az alapos, mindenféle elektrokémiai paraméter meghatározása, belső ellenállás növekedés kimérése után derült ki, hogy az egész rendszert gyakorlatilag elárasztották mindenféle, oda nem illő és nem várt mikrobák. Az anód felületi biofilmen kívül biofilm lerakódást tapasztaltak a cellulóz tartalmú ionogél membrán mindkét oldalán, sőt mikrobák jelentek meg a katódtérben és még a katód felszínén is. A mikrobiális invázió és katasztrófa kézenfekvő oka a biofilmek mikrobiológiai vizsgálatával bizonyosodott be: a membrán anód felületi oldalán képződő biofilmet ellepték, letarolták a *Clostridium* nemzetség képviselői, főként a *Clostridium termitidis* faj (23,2% abundanciával). A *Clostridium*okról köztudott mikrobiológiai körökben, hogy felettébb specializálódott celluloszóma extracelluláris enzim-fehérje rendszerrel rendelkeznek, amivel igen hatékonyan bontják le a számukra értékes tápanyagként szolgáló cellulózt. Az is ismert, hogy a szennyvíz iszapban általában gyakran fordulnak elő az egyébként változatos anyagcserét végezni képes, tehát jelentős túlélési potenciállal rendelkező *Clostridium*ok. Mindezeket összevetve az lett volna meglepő, ha a szennyvíz iszap inokulummal indított MÜC-ben bekerült *Clostridium*ok nem vetették volna boldogan és éhesen magukat a poliéterszulfon (PES) hálóra rögzített, cellulóz alapú ionogél membrán csemegére. Szorgos cellulóz lebontásuk (a cellulóz acetát nem gátolja, csak lassítja a lebontást) eredményeként gyakorlatilag több mikron méretű csatornák, alagutak alakulhattak ki a membránon keresztül, tehát sok ponton egyszerűen összeomlott a molekuláris határzár. Az alaposan sérült, megrongálódott membránon pedig kontrollálhatatlan ion és mikroba kalandozás, vándorlás vette kezdetét. Humán analógiával illusztrálva olyasmi történt ebben a MÜC-ben, mint amikor vasúti átjárót biztosító sorompókkal próbálták útját állni az emberi migráns tömegeknek. Ezt tükrözi a korábbiaknál kicsit alaposabban elvégzett mikrobiom analízis (46. 47. ábrák).

Hosszasan el lehetne csemegézni a mikrobiológiai szempontból kialakult kaotikus helyzetről és a kilyukadt membránon keresztül támadt oxigén gradiens befolyásoló hatásáról. De ehhez véleményem szerint a rendelkezésre álló metagenom adatok továbbra sem elegendőek és a további kutakodás a dolgozat célkitűzései

szempontjából érdektelen mellékvágányra vezetne. Az érdemi következtetés ebből a kísérletből az lehet, hogy jó gondolat a biopolimerek bevetése a MÜC membrán fejlesztésbe, de sokkal körültekintőbben kell az anyagokat kiválasztani figyelembe véve a rendszerben „garázdálkodó” mikrobák tulajdonságait, igényeit.

5.6. AMHPES, AMHPP és CMHPES és CMHPP membránok biológiai eltömődése: membrán k_o érték szerepe. c. fejezetben leírt kísérletek és metagenom vizsgálatok eredményei elég meggyőzően igazolják az oxigén áteresztő képesség (k_o) meghatározó szerepét a membránon kialakuló biofilm összetételében és valószínűleg az eltömődés időbeli kialakulásában. Ez értékes eredmény, amit a hasonló rendszerek fejlesztésekor figyelembe kell venni.

Összefoglalva: mint minden összetett kutatási program, Bakonyi Péter itt bemutatott munkája is értékes hozzájárulást és új szempontokat tárt fel a MÜC minél hatékonyabb és fenntartható alkalmazása területén. Ugyanakkor, mint minden összetett kutatási program, számos további megismerésre váró feladat is vár az ígéretes kutatási terület előtt. Véleményem szerint ez a munka több ponton komoly előrelépést jelent a MÜC széleskörű, gyakorlati hasznosítása felé, az elvégzett kísérletek és számítások a mai tudományos kritériumok szerint élenjáró kutatásnak tekinthetők. Ez egyértelműen indokolja, hogy Bakonyi Péter bőven megérett az MTA Doktora elismerés elnyerésére. A várhatóan sikeres nyilvános védést követően

**javaslom és támogatom Bakonyi Péter számára az
MTA Doktora cím odaítélését.**

Szeged, 2025. október 10.



Prof. Dr. Kovács Kornél, Emeritus Professor
az MTA Doktora