



Opponensi vélemény Bakonyi Péter „Mikrobiális üzemanyagcellák vizsgálata a membránok perspektívájából” című MTA doktori értekezéséről

Bakonyi Péter doktori értekezése egy **időszerű és jelentős tudományos-területen**, a **mikrobiális üzemanyagcellák (MÜC)** kutatásában ért el eredményeket, különös figyelemmel a cellákban alkalmazott **membránokra és azok hatásaira**. A téma *interdiszciplináris jelentőségű*: a MÜC-ök a szennyvíztisztítás és az energia-termelés összekapcsolásának ígéretét hordozzák, hiszen a szerves anyagok mikrobiális lebontása közben közvetlenül villamos energiát nyerhetünk. A dolgozat bevezetése átfogóan indokolja a témaválasztást: rávilágít a mikrobiális elektrokémiai technológiák fejlődésére és a még megoldandó problémákra, mint például a biofilm-képződés kontrolljára és különösen a membránok biológiai eltömődésének (biofouling) kérdésére. A jelölt helyesen ismeri fel, hogy a membrán–mikroba interakciók vizsgálata kulcsfontosságú a MÜC-ök továbbfejlesztésében.

A **szakirodalmi áttekintés** 109 szakirodalmi hivatkozást dolgozott fel, és jól felöleli a kapcsolódó területeket: áttekinti a MÜC működési alapjait, elektrokémiai jellemzőit, tervezési aspektusait (elektródok, exoelektrogén mikroorganizmusok), majd mélyrehatóan tárgyalja a membránok szerepét a két reaktortér elválasztásában, az ion- és anyagtranszportban, valamint a biofouling jelenséget. A dolgozat kitér a hagyományos és alternatív membrántípusokra is (protoncserélő Nafion, kation/anioncserélő polimerek, kerámia és pórusos membránok, ioncserélő gyanták stb.), bemutatva a nemzetközi kutatások trendjeit és hiányosságait. A szakirodalom feldolgozása *naprakész* – 2023-as publikációk is szerepelnek –, és jól megalapozza a kutatási hipotéziseket.

A **célkitűzések** világosan megfogalmazottak, három fő irányt ölelnek fel: (i) Különböző monopolaritású ioncserélő polimer membránok összehasonlító vizsgálata MÜC-ben az elektrokémiai teljesítményre és az anódbiofilm mikrobiológiájára gyakorolt hatásuk alapján; (ii) Új fejlesztésű membránok (ionos folyadékkal impregnált támasztóréteges membránok – SILM – és ionogélek) előállítása, jellemzése és tesztelése MÜC-ben; (iii) A membránokon kialakuló biofouling folyamatok feltárása különböző membrántulajdonságok tükrében. E komplex célrendszer jól mutatja a jelölt rendszerszintű szemléletét: a membrán anyagi jellemzőit, a MÜC elektrokémiai hatékonyságát és a biofilm-képződést egységben vizsgálja. Itt jegyzem meg, hogy a „támasztóréteges folyadékmembrán” kifejezés nekem nagyon zavaró, bár látom, hogy a kutatócsoport évek óta ezt a kifejezést használja.

A **kutatási módszerek** megalapozottak és korszerűek. A jelölt kísérleteit gondos tervezés jellemzi, amelyben anyag-, mikrobiológiai és elektrokémiai vizsgálatok integráltan valósultak meg. A dolgozat részletesen leírja a vizsgálati módszereket:

- A különféle membránok **fizikai-kémiai jellemzőinek mérése** (ioncserélő kapacitás titrálással, proton-, szubsztrát- és oxigénátbocsátási együtthatók meghatározása kéttérű cellában, impedancia spektroszkópia stb.).



- **Mikrobiális üzemanyagcellák üzemeltetése** standardizált kétterű H-cella konfigurációban, azonos körülmények között. A kísérleti rendszer reprodukálhatóságára figyelve minden MÜC-ben egységes elektródanyagokat (pl. grafit szénfilc anód, platinázott katód) és táptalajként definiált összetételű pufferoldatot alkalmazott. Az üzemi paramétereket (külső terhelő ellenállás, szubsztrát adagolás ciklusai stb.) tudatosan hangolta a vizsgálati kérdéseknek megfelelően. Például hosszú, ~40 napos kísérletsorozatok is szerepelnek a membránok öregedésének nyomon követésére.
- **Elektrokémiai monitorozás és analízis:** A MÜC-k teljesítményét folyamatos feszültség-idő regisztrálással követte nyitott áramkörű és terhelt állapotban. Az adatokból áramerősség- és teljesítménysűrűségeket számolt, valamint a Faraday-hatásfokot (amit valamiért coulombikus hatásfoknak nevez) meghatározta. Rendszeresen felvette a polarizációs görbéket a cellák belső ellenállásának és munkapontjának jellemzésére. Emellett ciklikus voltammetriát (CV) alkalmazott az anódbiofilm redoxi-aktivitásának vizsgálatára, illetve elektrokémiai impedancia-spektroszkópiát (EIS) a belső ellenállás komponenseinek (ohmikus, töltésátviteli, diffúziós ellenállások) szétválasztására.
- **Mikrobiológiai elemzések:** A jelölt nem elégedett meg csupán az elektrokémiai adatokkal, hanem a biofilmek összetételét is vizsgálta. Mintát vett az anódfelületi biofilmekből, a membránokon kialakult lerakódásokból és – összehasonlításképp – az induló inokulumból, majd ezeket 16S rRNS génalapú amplicon szekvenálással elemezte. A kapott taxonómiai megoszlásokat főkomponens-analízissel értékelte. A mikrobiológiai vizsgálatoknak köszönhetően a dolgozat nem „fekete dobozként” kezeli a biofilmeket, hanem konkrét mikrobiális komponensek szintjére jut le. Kiderült például, hogy az anódokon az exoelektrogén *Geobacter* fajok jelentek meg nagy arányban minden kísérletben.
- **Membránfejlesztés:** A jelölt aktívan részt vett új membránok előállításában is. Részletesen ismerteti egy ionos folyadékkal impregnált PVDF membrán (SILM) és egy cellulóz-alapú ionogél membrán szintézisét (oldási-fázisinverziós eljárással).

A kísérletek megtervezése és a többféle módszer alkalmazása azt eredményezte, hogy a dolgozat **állításai erős kísérleti bizonyítékokon nyugszanak**, és a módszerek megfelelnek az *MTA Doktori értekezés* által elvárt tudományos színvonalnak. 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).

A dolgozat tudományos újdonságai és az eredmények jelentősége

Bakonyi Péter értekezése **öt fő új tudományos eredményt** fogalmaz meg, amelyek mind a membránok MÜC-ben betöltött szerepének jobb megértéséhez és az eszközök optimalizálásához



járulnak hozzá.

(1) Különböző polimer membránok összehasonlítása MÜC-ben: A jelölt három membrántípust vizsgált közvetlenül összehasonlítva: egy kationcserélő membránt (AN–VPA CEM), egy új típusú anioncserélő membránt (PSEBS DABCO AEM) és egy standard protoncserélő membránt (Nafion 115). Megállapította, hogy az anioncserélő membrán használata mindhárom kimeneti paraméter (áramsűrűség, fajlagos és kumulált energiatermelés) esetén felülmúlja a másik két membránt. Ezen különbség okát a szerző részletesen elemezte: az anioncserélő membrán csökkenti a cella belső ellenállását, főként azáltal, hogy mérsékli a diffúziós korlátokat és a pH-gradiens negatív hatásait a cellában.

(2) Az anódbiofilm kialakulása és összetétele: Habár a különböző membránok befolyásolták a cella elektrokémiai viselkedését, a kísérletek egyik érdekes felismerése, hogy az anódon képződő elektromikrobiális biofilm összetételét a membrántípus alig befolyásolta. Mindegyik rendszerben hasonló, exoelektrogén törzsekben gazdag biofilmek fejlődtek. Ez a *Geobacter spp.* jelenlét a MÜC-kben ismert jelenség, de újdonság, hogy kimutatta: a különböző membránok nem gátolták meg e kívánatos elektroaktív baktériumok elszaporodását.

(3) A membrán-biológiai eltömődés (biofouling) vizsgálata: A dolgozat kitér a membránok felületén képződő biofilmrétegekre is. Új eredménye, hogy a membránokon kialakuló ún. fouling biofilm összetételét elsősorban a kiinduló mikrobiális közösség (inokulum) határozza meg, nem pedig maga a membrán anyaga. A szerző kísérletileg igazolta továbbá, hogy a különböző membránok oxigénáteresztő-képessége (k_o) befolyásolja a fouling réteg összetételét. Az eredmények gyakorlati üzenete, hogy a fouling kezelésénél figyelembe kell venni az inokulum összetételét is, és hogy bizonyos membrántípusok „aerob pufferezónát” hoznak létre, ami akár hasznos is lehet a rendszerszintű stabilitás szempontjából.

(4) Új membrántípusok fejlesztése és tesztelése: A kutatómunka jelentős része irányult új membránok kipróbálására a MÜC-ben. Két innovatív membrántípust alkalmazott először: (i) hordozós ionos folyadék membrán (SILM) – egy hidrofób PVDF hordozómembránt impregnált 1-butil-3-metilimidazólium alapú ionos folyadékokkal; (ii) Cellulóz-alapú ionogél membrán, melyet [BMIM][Cl] ionos folyadékban oldott mikrokristályos cellulózból állított elő, PES háló erősítéssel. Mindkét újszerű membrán sikeresen működött a MÜC-kben, ami fontos technológiai demonstráció.

5) A cellulóz-ionogél membrán esetében a szerző elsőként mutatta be ennek alkalmazását MÜC-ben. Megállapította, hogy az ionogél membrán proton- és oxigénáteresztése kedvező, ugyanakkor a szubsztrát-áteresztése jelentősen nagyobb, ami nem kívánatos szubsztrát-vesztéshez vezet. Ennek következményeként az ionogél membránnal működő cella belső ellenállása ~25%-kal magasabb volt, és a termelt energia mennyisége szignifikánsan elmaradt a Nafionos rendszerétől.

A fenti eredmények jelentőségét alátámasztja, hogy a szerző számos rangos nemzetközi folyóiratban publikálta őket (Bioresource Technology, Journal of Membrane Science, Separation and Purification Technology stb.), jelezve, hogy a tudományos közösség is új ismeretként értékeli ezeket a megállapításokat. Összességében Bakonyi Péter munkája komplex képet ad a membránok és a mikrobiális folyamatok összefüggéseiről MÜC-kben. Az eredmények előremozdítják a területet: hozzájárulnak hatékonyabb MÜC tervezéséhez (membrán-optimalizáláshoz), és új kutatási irányokat (ionos folyadékos membránok, biofouling kezelési stratégiák) alapoznak meg.



Összefoglalva, Bakonyi Péter “Mikrobiális üzemanyagcellák vizsgálata a membránok perspektívájából” című MTA doktori jelentős önálló hozzájárulást nyújtott a bioelektrokémiai rendszerek és membrántechnológia határán lévő kutatási területen. A dolgozat a kitűzött célokat teljesítette: új tudományos eredményeket mutatott be a MÜC-k membránjellemzőinek és biofolyamatainak összefüggéseiben, és ezek relevanciáját alátámasztotta. A disszertáció megfelel az MTA doktori értekezésekkel szemben támasztott követelményeknek. A benne foglalt eredmények eredetiek, jól dokumentáltak és a kémiai tudományok területén fontosak. A jelölt bizonyította, hogy képes önálló tudományos problémamegoldásra, az eredmények szintézisére és kritikus értelmezésére. Munkája során a tudományos ismereteket számottevően bővítette, különösen a bioelektrokémia és membrántechnológia metszetében. **Az értekezést – az ábraanyag grafikai hiányosságaitól eltekintve – jónak tartom, és Bakonyi Péter teljesítménye alapján javaslom számára az MTA doktora cím odaítélését.**

Tudományos kérdések Bakonyi Péter disszertációjához

1. 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)?
2. 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?
3. A disszertáció eredményei szerint a membrán típusa erősen befolyásolja a MÜC 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)?
4. A dolgozat bevezette a membrán egy kritikus oxigénátersztési 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 MÜC teljesítményének optimalizálására?
5. 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?
6. 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?

7. 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?
8. 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?

Bakonyi Péter értekezése a mikrobiális üzemanyagcellák és membrántechnológia területén jelentős, nemzetközileg is értékelhető hozzájárulást nyújt. A dolgozat megfelel az MTA doktori értekezésekkel szemben támasztott tudományos és formai követelményeknek. A bemutatott eredmények újszerűek, a módszertan megalapozott, az érvelés koherens. **Mindezek alapján javaslom a szerző számára az MTA doktora cím odaítélését.**

Dr. Janáky Csaba

Szegedi Tudományegyetem, egyetemi docens,
Kompetencia Központ-vezető

