37. OTDK Biológia Szekció

Biofotovoltaikus rendszer tervezése és optimalizálása *Parachlorella kessleri* MACC-38 algatörzs alkalmazásával

Kőházi-Kis Anna

Molekuláris Bionika Mérnöki BSc 4. félév

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpont

Növénybiológiai Intézet

Témavezetők:

Dr. Nia Petrova - tudományos munkatárs

Dr. Tóth Szilvia Zita- tudományos tanácsadó

Szeged, 2025

Tartalmi összefoglaló:

Természeti erőforrásaink gyors ütemű fogyása, különösen a fosszilis energiahordozóké, egyre sürgetőbbé teszi az alternatív, fenntartható energiaforrások kifejlesztését. A fosszilis tüzelőanyagok fokozódó kimerülésével egyidejűleg számos fenntartható energiaforrást, például a napenergiát, szélenergiát, hidrogénalapú rendszereket, valamint bioüzemanyagokat vizsgálnak világszerte. Bár ezek a források hozzájárulnak az energiaigények kielégítéséhez, komoly kihívásokkal kell szembenézniük: a napelemek és szélturbinák előállítása jelentős anyag- és költségigényű, az energiatárolás problémája még mindig nem teljesen megoldott, és az energiatermelési hatékonyságuk is korlátozott. A fotoszintetizáló mikroorganizmusok, például zöldalgák általi elektromosáram-termelés a zöldenergia-termelés újszerű megközelítése, amely csak az elmúlt évtizedben vált ismertté. Ebben a megközelítésben az algák úgy termelnek áramot, hogy elektronokat adnak át egy elektrokémiai cella anódjának, amelyet alga bio-fotovoltaikus celláknak (BPV) neveznek. A mikroalgák által termelt elektromos áram forrása a fotoszintézis és a katabolikus folyamatok, így a mikroalgák fényben és sötétben is képesek áramot termelni. Ennek a megközelítésnek további előnyei közé tartozik a magas fenntarthatóság, az önregenerálódás és a CO_2-megkötés lehetősége. Míg a BPV hatékonysága jelenleg alacsony, ez megfelelően kiválasztott algatörzsek használatával jelentősen javítható lehet.

Jelen munkában egy alga BPV tervezését és annak áramtermelésre való optimalizálását mutatjuk be a *Parachlorella kessleri* MACC-38 zöldalgatörzzsel, amelyről nemrégiben kimutatták, hogy akár 10-szer nagyobb elektromos áramot képes termelni, mint a *Chlamydomonas reinhardtii* modell zöldalgafaj.

Első lépésként készítettünk egy BPV-t, amely grafitos anóddal és katóddal, valamint Ag/AgCl referenciaelektróddal működik, amelyet folyamatosan steril levegővel buborékoltatva algaszuszpenzióba merítettünk. A mérsékelt, 60 μmol foton m-2 s-1 fényintenzitást LED panel biztosította, elektronmediátorként pedig kálium-ferricianidot (FeCN) használtunk. A BPV termelékenységének maximalizálása érdekében meghatároztuk az optimális FeCN koncentrációt. 7,5 mM FeCN jelenlétében, 505 μA cm^{-2} áramsűrűséget értünk el, amely igen kiemelkedő, miközben megőriztük a sejtnövekedést és életképességet. Végül, hogy még egy lépést tegyünk a MACC-38 áramtermelésre való alkalmazása felé, teszteltük a hatékonyságot fény/sötét (12/12 óra) ciklusok alkalmazása esetén és szénforrás hiányában. A MACC-38 villamosenergia-termelése egyértelmű fényfüggést mutatott, és legalább négy napig tartott.

Rövidítések

BPV: biofotovoltaikus,

FeCN: $FeCN^{4-,3-}$

IEET: közvetett extracelluláris elektrontranfszer,

DEET: közvetlen extracelluláris elektrontranfszer,

RBO: Respiratory burst oxidase,

NOX: NADPH-oxidáz enzim,

Kl: klorofill

Tartalomjegyzék

1.Bevezetés **5**

1.1. Biofotovoltaikus rendszerek 5

1.2. Két- és három elektródás BPV rendszerek 5

1.3. Közvetett és közvetlen villamosenergia termelés 7

1.4. Exoelektrogenezis 8

1.5. A fotoszintetikus organizmus kiválasztásának jelentősége 9

2.Célkitűzések **11**

3.Anyagok és módszerek **12**

Algakultúrák 12

Elektromos áram mérése 12

Sejtek életképessége áramtermelés után 12

Klorofill koncentráció meghatározása 13

Sejtszám mérése 13

Klorofill-a fluoreszcencia-indukció 13

Adatok kiértékelése 13

4.Eredmények **14**

4.1.Háromelektródás BPV berendezés tervezése és kivitelezése 14

4.2.Optimális FeCN koncentráció 15

4.3.Nap-éj ciklus kivitelezése 19

5.Diszkusszió 21

6. Köszönetnyilvánítás 24

7. Irodalomjegyzék 25

1. Bevezetés

1.1. Biofotovoltaikus rendszerek

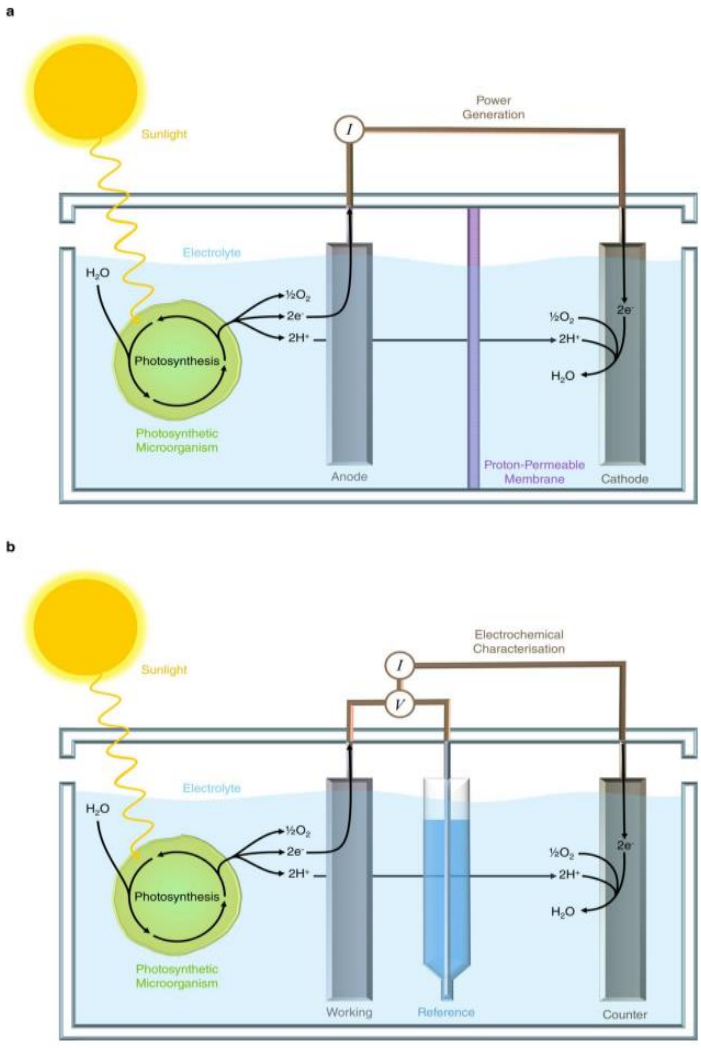
A biofotovoltaikus rendszerek (BPV) fotoszintetizáló mikroorganizmusokat vagy izolált fotoszintetikus pigment-protein komplexeket használnak fel elektromos áram előállítására (Wey et al., 2019). Ez a technológia biológiai rendszerek felhasználásával képes a napenergiát villamos-energiává alakítani, ezáltal környezetbarát alternatívát nyújtva a fosszilis tüzelőanyagokkal szemben (Bateson et al., 2018).

Összességében a BPV egy elektrokémiai cella, amelyben élő fotoszintetizáló mikroorganizmusok (J. McCormick et al., 2015), izolált fotoszintetikus membránok vagy pigment-fehérje komplexek elektronokat adnak át a cella anódjának. Az anódhoz juttatott elektronok a katódhoz kerülnek továbbításra, H^+, O és egy külsőleg hozzáadott elektronakceptor segítségével (Rosenbaum et al., 2011). Az elektromos áramot egy potenciosztát nevű eszközzel mérik (Wey et al., 2019).

1.2. Két- és három elektródás BPV rendszerek

A rendszerben használt elektródák típusa alapján kétféle BPV-típus létezik (Wey et al., 2019). A kételektródás rendszerek egy anódból (munkaelektród) és egy katódból (ellenelektród), amelyek külső áramkörön keresztül vannak összekötve (1A ábra). A rendszer két elektródája elhelyezhető egy közös elektrolitba merülő kamrában, de a katód proton-permeábilis membrán segítségével el is különíthető az sejtektől. Az ilyen rendszerekben az elektromos áram az Ohm-törvény alapján számítható, különböző ellenállások alkalmazásával, miközben a feszültséget voltmérővel mérjük. Az áramot ezen kívül egy potenciosztáttal is detektálhatjuk, amely stabil torziós feszültség fenntartását teszi lehetővé az anód és katód között az áram mérésének ideje alatt. A kételektródás rendszert olyan algafajok áramtermelésének vizsgálatára alkalmazták, mint pl. a *Chlorella* sp, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella tertiolecta, Synechocystis* sp., és *Synechococcus* sp (McCormick et al., 2011). A rendszer egyszerű felépítése lehetővé teszi a BPV fenntarthatóságának bemutatását, például olyan berendezésekben, mint a Bio-Bottle-Voltaic, amely újrahasznosított anyagokból — műanyag palackból, alumíniumdobozból — és *Chlorella sorokiniana* algából készült (Bateson et al., 2018). A kételektródás rendszerek egyik jelentős hátránya, hogy nem teszik lehetővé a bioelektromosságot előállító élő mikroorganizmusok élettani folyamatainak mélyreható tanulmányozását (Wey et al., 2019).

A háromelektródás rendszerek (1B ábra) egy anódból, katódból és referenciaelektródból állnak (Wey et al., 2019). A rendszer fő előnye, hogy lehetőséget biztosít az anódon alkalmazott potenciál pontos szabályozására a referenciaelektródhoz viszonyítva. Referenciaelektródként általában kalomelt (Hg_2Cl_2) vagy Ag/AgCl-t használnak, jól ismert elektrokémiai tulajdonságaik miatt. A stabil potenciál fenntartása az anód és a referenciaelektród között lehetővé teszi a termodinamikai és kinetikai folyamatok pontosabb értékelését, növelve ezzel a rendszer megbízhatóságát (Wey et al., 2019). A három elektródás rendszereket széles körben alkalmazzák az algák elektrokémiai tulajdonságainak vizsgálatára speciális körülmények között. Például kinonvegyületek használatával a *Chlamydomonas reinhardtii*-t (Longatte et al., 2018), egyfalú szén-nanocsövek alkalmazása mellett a *Synechocystis sp.* esetében (Antonucci et al., 2022), valamint a fenazinokat elektronközvetítőként alkalmazó *Synechocystis*-BPV rendszerben (Clifford et al., 2021).

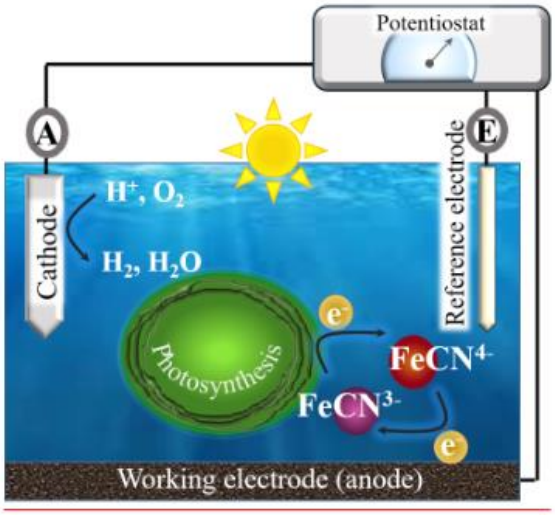


1. ábra Két elektródás (A) és három elektródás (B)rendszer ábrázolása (Wey et al., 2019).

1.3. Közvetett és közvetlen villamosenergia termelés

Egy másik kategorizálása a BPV rendszereknek az anód és a sejtek közti kapcsolat alapján történik (J. McCormick et al., 2015). Az első típus, a mediátor nélküli közvetlen extracelluláris elektrontranszfer (DEET), amelynél a közvetlen kapcsolat egy nem diffundáló struktúrán keresztül jön létre az anódon; ez a struktúra lehet membránfehérje, polimer vagy vezető filamentum.

A másik kategória a mediátort alkalmazó, közvetett extracelluláris elektrontranszfer (IEET), ahol a mediátor (2. ábra) egy redox-aktivitású diffúz anyag, ami keletkezhet a mikroorganizmusainak belső folyamatai által (endogén), de külsőleg is hozzáadható a rendszerhez (exogén) (Tschörtner et al., 2019). Az exogén közvetítő előnye, hogy könnyen pótolható a folyamat során. A fotoszintetizáló mikroorganizmusok esetében az endogén EET mechanizmusok mediátorai kapcsán azonban még számos kérdés megválaszolásra vár. Például cianobaktériumokban a fenazinok, flavinok és kinonok közvetítő szerepét vizsgálták, de eddig nem találtak genetikai bizonyítékot eme anyagok kiválasztására ezekben a mikroorganizmusokban (Anderson et al., 2016). Zöldalgákban ugyancsak nem sikerült extracelluláris redox mediátor termelését kimutatni. Bár különböző fotoszintetizáló mikroorganizmusoknál már igazolták a közvetítő nélküli áramtermelést (Bombelli et al., 2022; Thong et al., 2019; McCormick et al., 2011; Ng et al., 2014; Saper et al., 2018), általánosan elfogadott, hogy magasabb elektromos áram érhető el közvetített BPV-rendszerekben, amit például a *Dunaliella salina* esetében világosan bizonyítottak (Shlosberg et al., 2021a).



2. ábra A FeCN és a fotoszintetizáló mikroorganizmusok kölcsönhatásának mechanizmusa BPV anóddal.

Az exogén elektronmediátorok emiatt gyakran használnak BPV rendszerekben. A megfelelő mediátor kiválasztásakor viszont fontos szempont annak redoxi-potenciálja, mivel a termodinamikai elvek alapján az elektronok csak a negatívabb potenciálú helyekről áramolnak a pozitívabb felé (Tschörtner et al., 2019). Ennek megfelelően a mediátornak az elektrontranszport útvonal egy kulcskomponensénél valamennyivel pozitívabbnak kell lennie. Az ilyen rendszerekben gyakran alkalmazott mediátorok a kálium-ferricianid (FeCN) (McCormick et al., 2011; Shlosberg et al., 2021b; Petrova et al., 2024) és kinonok (Longatte et al., 2018; Sayegh et al., 2021). A kinonok fő korlátai, hogy bár hatékony mediátorok, jelentősen csökkenthetik az algák életképességét, míg a FeCN toxicitása mérsékelt, így kevésbé gátolja a sejtnövekedést (Longatte et al., 2018). A ferricianid viszont egy lipofób molekula, amely nem képes áthatolni a plazmamembránon (Kusama et al., 2022), így kevésbé citotoxikus, mint a kinonok (J. McCormick et al., 2015). Vízben oldódó tulajdonsága miatt könnyen hozzáadható a BPV rendszerekhez (Clifford et al., 2021), és széles körben használják őket (Anderson et al., 2016; J. McCormick et al., 2015; Tschörtner et al., 2019).

1.4. Exoelektrogenezis

Az élő biológiai sejtek elektronexportjának folyamatát exoelektrogenezisnek nevezzük (Wey et al., 2019). Ez a folyamat magában foglalja a mikroorganizmusok plazmamembránján zajló többszörös redoxireakciókat, valamint a redoxiaktív vegyületek exportját a sejtekből (Hasan et al., 2017).

Kutatások kimutatták, hogy a *C. reinhardtii* zöldalga sejtjeiben az elektronok túlnyomórészt exoelektrogenezis útján kerülnek exportálásra. Ez az elektrontranszport a plazmamembrán NADPH-oxidáz (NOX) enzimei, mint például a Respiratory burst oxidase 1 és 2 (RBO1, RBO2) aktivitásán keresztül valósul meg (Anderson et al., 2016). Ezek azok az enzimek, amelyek az állatok, növények és algák sejtjeiben is megtalálhatók (Anderson et al., 2011), és katalizálják az elektronok átadását a citoszolikus NADPH-ról az extracelluláris oxigénre. Ennek következtében extracelluláris szuperoxid-anion (O_2^-) képződik (Sagi et al., 2004), ami hozzájárul a sejtek redoxipotenciál változásához és a sejtek közötti kommunikációhoz.

Az elektronexportot biztosító redoxireakcióknak egy másik csoportja nyomelemek, például a vas és a réz felvételét segíti a zöld algákban. A vas és réz felvételének mechanizmusában a vas- és rézreduktáz enzimek játszanak kulcsszerepet, amelyek redukciós

folyamatokkal segítik ezeknek a nyomelemeknek a bejutását a sejtekbe (Allen et al., 2007; Hill et al., 1996). A *C. reinhardtii* zöldalgában a vas-reduktáz enzim szerepe az elektronexportban különösen vashiányos körülmények között mutatható ki. Ilyen környezetben megnövekedett vas-reduktáz expressziót és intenzívebb elektronexportot figyeltek meg (Allen et al., 2007; Weger & Espie, 2000). Hasonlóképpen az elektrontranszportban szereplő rézreduktáz fontos szerepet játszik, amit a *C. reinhardtii*-ban sikerült kísérletesen bizonyítani (Hill et al., 1996).

Korábbi kutatások alapján feltételezték, hogy a NADPH extracelluláris redox-mediátorként működhet cianobaktériumokban és zöldalgákban is (Shlosberg et al., 2021a). Kusama és munkatársai (2022) azonban megcáfolták ezt a hipotézist, mivel vizsgálataik során nem találtak NADPH jelenlétére utaló bizonyítékot a sejtek felülúszójában. Ezenkívül a NADPH extracelluláris redox-aktivitását a mai napig nem erősítették meg a zöldalgák esetében sem, így a kérdés további vizsgálatokat igényel.

1.5. A fotoszintetikus mikroorganizmus kiválasztásának jelentősége

A fotoszintetizáló mikroorganizmusok, például a *C. reinhardtii* és a *Synechocystis* sp. fontos modellszervezetek az exoelektrogenezis mechanizmusainak megértésében (Kusama et al., 2022; Anderson et al., 2016; Wey et al., 2021). Azonban más, nem modellszervezet számottevően magasabb áramtermelésre képes, például a *Trichodesmium erythraeum* hatszor több áramot generált, mint a *Synechocystis* (Shlosberg et al., 2021a).

Egy új, különösen exoelektrogén zöldalga törzset, a *Parachlorella kessleri* MACC-38-at, amely a Mosonmagyaróvári Algakultúra Gyűjteményből származik (Széchenyi István Egyetem, Magyarország), a közelmúltban Tóth Szilvia Zita kutatócsoportja megvizsgált, és kimutatták, hogy több mint 340 $\mu A\ mg^{-1}$ Chl cm^{-2} áramot termel. Ez az érték 10-szerese a *C. reinhardtii* és 3-4-szerese más *P. kessleri* törzsek áramtermelésének (Petrova et al., 2024). Ezen felül a törzs növekedését és fotoszintetikus aktivitását nem befolyásolta a FeCN jelenléte, ami arra utal, hogy a *P. kessleri* MACC-38 alkalmas lehet a fenntartható bioenergia-termelésre (Petrova et al., 2024). Ezeket a vizsgálatokat azonban rövid ideig (20 perc) és kis mennyiségű kultúrával (mikroliteres mennyiségű) végezték FeCN-közvetítésű BPV-ben. Ahhoz, hogy hosszú távú villamosenergia-termelési potenciálját megbízhatóan megállapítsuk és optimalizáljuk, többnapos vizsgálatokra van szükség, nagyobb térfogatú (több tíz milliliter) kultúrával, természetesebb körülmények között, például mérsékelt fény és nappali/éjszakai

ciklusok alkalmazásával. Az ilyen típusú vizsgálatok jelentősen hozzájárulhatnak a *P. kessleri* MACC-38 BPV-ben való alkalmazhatóságának továbbfejlesztésében.

2. Célkitűzések

2.1. Háromelektródás alga-BPV rendszer tervezése és megépítése, amely többnapos villamosenergia-termelésre alkalmas.

2.2. A hosszú távú villamosenergia-termelés feltételeinek optimalizálása a nagymértékben exoelektrogén *P. kessleri* MACC-38 törzs elektromos áramtermeléséhez.

2.3. A *P. kessleri* MACC-38 villamosenergia-termelésének tesztelése megvilágítási körülmények között.

3.Anyagok és módszerek

Algakultúrák

A MACC-38 törzs a Mosonmagyaróvári Algakultúra Gyűjteményből származik (Széchenyi István Egyetem, Magyarország) (Horváth et al., 2023), és szilárd Tris-acetát-foszfát (TAP) táptalajon tartottuk. A MACC-38 törzsből 0,5 × 10^6 sejt/ml koncentrációjú szuszpenziós tenyészeteket állítottunk elő. Az algakultúrákat 100 ml-es Erlenmeyer-lombikokban, 120 rpm sebességgel működő rotációs rázógépen neveltük, 70 µmol foton m^{-2} s^{-1} intenzitású, folyamatos fehér fény mellett, amit Sylvania Luxline Plus fluoreszcens fénycsövek biztosítottak. Az elektromos áram mérése előtt a MACC-38 kultúrákat 3 napig tenyésztettük, majd kétszer mostuk TAP vagy Trisz-foszfát (TP) táptalajjal, és a sejtek sűrűségét 20 µg/ml klorofillkoncentrációnak megfelelő értékre állítottuk be.

Elektromos áram mérése

Az elektromos áramot idő függvényében egy többcsatornás potenciosztáttal, a kronoamperometria (CA) elektrokémiai technikájával követtük nyomon (multiEmStat3, PalmSens BV, Hollandia).

A FeCN különböző koncentrációinak áramtermelésre gyakorolt hatását 60 ml MACC-38 szuszpenzióval töltött BPV edényben vizsgáltuk. A vizsgált FeCN-koncentrációk 0,5, 2, 5, 7,5, 10 és 20 mM voltak. A méréseket 40 órán át, folyamatos, 60 µmol foton m^{-2} s^{-1} intenzitású megvilágítás mellett végeztük. Ebben a kísérletben az anód és katód hossza 3,5 cm volt.

A hosszabb távú CA mérések céljából, amelyekben az áramtermelést 5 napon keresztül, négy fény/sötét ciklusban követtük nyomon, 80 ml tenyésztési térfogatot alkalmaztunk. Ebben az esetben az anód és a katód hosszúsága 4 cm volt.

Sejtek életképessége áramtermelés után

A MACC-38 sejtek regenerálódási és növekedési képességét 2 napos elektromos áramtermelés után, különböző FeCN-koncentrációk mellett, mérsékelt fényben vizsgáltuk. Először a MACC-38 sejteket TAP törzsoldattal mostuk, hogy eltávolítsuk a megmaradt FeCN-t. Tíz µl 1; 0,1 és 0,01 µg klorofill koncentrációjú sejtszuszpenziót vittünk fel szilárd TAP közegre. A tenyészetek növekedését 5 nap elteltével értékeltük.

Klorofill koncentráció meghatározása

Az algaszuszpenziók klorofillkoncentrációját spektrofotometriásan határoztuk meg a pigmentek 99 %-os metanollal történő extrakcióját követően(Benitez, 1989).

Sejtszám mérése

Az algaszuszpenziók sejtszámának meghatározását Luna-FL sejtszámlálóval (Logos Biosystems Ltd., Dél-Korea) végeztük.

Klorofill-a fluoreszcencia-indukciója

A klorofill a fluoreszcencia mérésekhez az algasejteket 10 percig sötétben tartottuk. A sötét-adaptált algasejteket Whatman üveg mikroszálas szűrőkre (GF/B) helyeztük. A klorofill fluoreszcencia indukciós tranzienseket HandyPEA készülékkel (Hansatech Instruments Ltd., Egyesült Királyság) mértük. Az F_V/F_M értékeket a következőképpen számítottuk ki: $F_V/F_M = (F_M - F_0)/F_M$, ahol F_0 a minimális Kl-a fluoreszcencia, F_M pedig a Kl-a fluoreszcencia maximális intenzitása.

Adatok kiértékelése

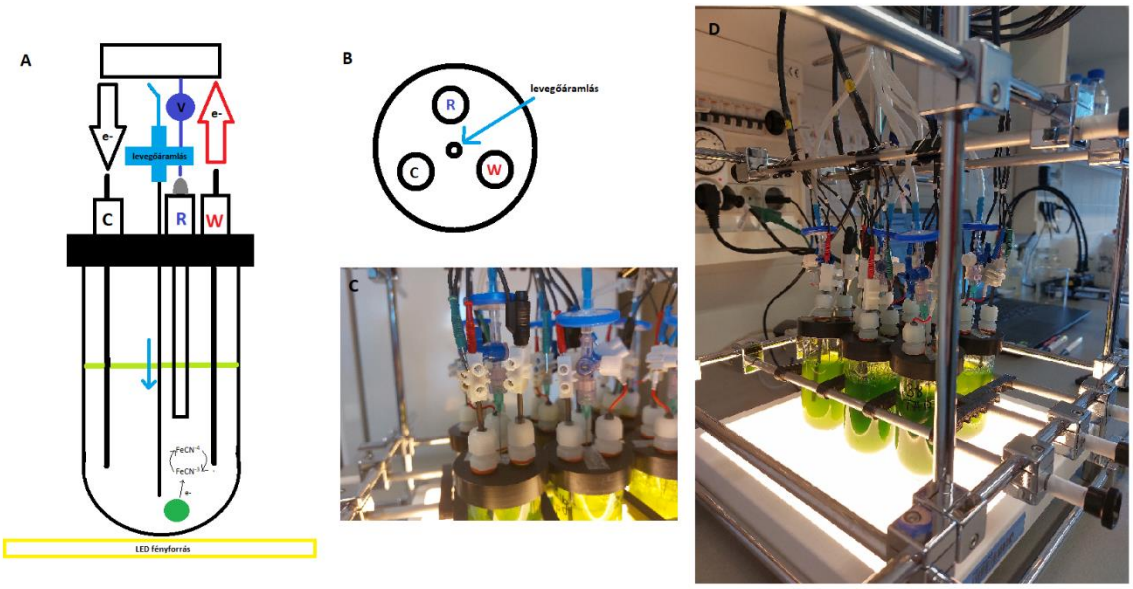
Az adatok ábrázolását, kiértékelését és a statisztikai elemzéseket az OriginPro 9.0 szoftverrel végeztük. A statisztikai szignifikancia megállapításához egyirányú varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztunk, amelyet Holm-Sidak post-hoc teszttel egészítettünk ki, hogy az egyes kezelési csoportok és a kontrollok közötti különbségek statisztikai szignifikanciáját ($p < 0,05$) precízen értékelhessük. Ez a módszer lehetővé tette számunkra, hogy az egyes kezelési feltételek hatását megbízhatóan összehasonlítsuk a kontrollértékekkel, és így részletesen értékelhessük a FeCN különböző koncentrációinak hatását az áramtermelésre és a *P. kessleri* MACC-38 élettani állapotára.

4. Eredmények

4.1. Háromelektródás BPV berendezés tervezése és kivitelezése

A BPV rendszer kialakítása kifejezetten arra irányult, hogy optimalizáljuk a hosszú távú elektromos áramtermelés feltételeit a nagymértékben exoelektrogén MACC-38 zöldalga törzs számára. Ennek érdekében a BPV-t úgy terveztük meg, hogy lehetővé tegye a következőket:

- Az elektromos áram napokon át tartó idő függvényében történő folyamatos mérését,
- Stabil potenciál fenntartását az anód és a referenciaelektród között, lehetővé téve az exoelektrogenezis folyamatainak részletes vizsgálatát az adott törzsben,
- A növekedési feltételek változtatásának lehetőségét az elektromos áramtermelés alatt, amely elősegíti az optimális áramtermelési körülmények azonosítását.



3.ábra A tervezett BPV rendszerünk (A) és annak 3D nyomtatott fedelének felülnézeti (B) sematikus ábrázolása. A három elektródot a W (munkaelektród), C (ellenelektród) és R (referenciaelektród) jelöli. Ezenkívül látható az elektródok összekapcsolása (C), és a teljes állványzat (D).

Az anód- és katódelektródák 3 mm átmérőjű és 3,5–4 cm hosszúságú grafitrudakból (Sigma-Aldrich, 496537-43,5g) álltak, míg a referenciaelektródaként Ag/AgCl típusú elektródákat (KCl-oldat, BASi, MF-2056) használtunk. Tenyésztőedényként 100 ml-es üvegcsöveket alkalmaztunk, amelyek légmentesen zárható fedelében három nyílás volt a grafitelektródák és az Ag/AgCl elektróda rögzítésére (3B ábra). Ezáltal biztosítottuk az

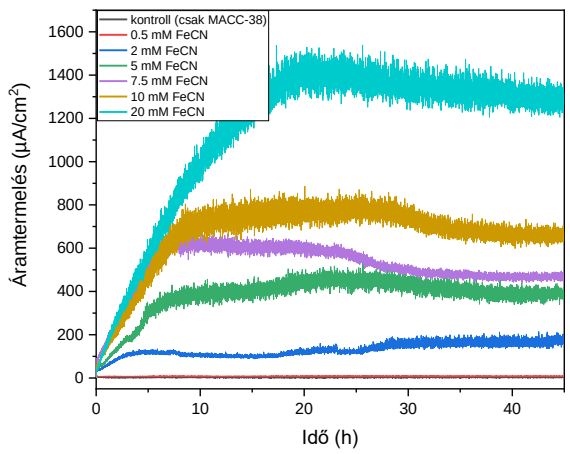
elektródák stabil rögzítését, és a tenyészetek sterilitását. A rendszer részei az anód, a katód és a referenciaelektród, amelyeket banáncsatlakozókkal csatlakoztattunk a potenciosztát csatornáihoz egy csokoládédoboz-csatlakozó segítségével (3C ábra). Az algatenyészetek levegőztetését és keverését egy akváriumi légszivattyú biztosította, amely a steril levegőt egy Millex-GS MF-Millipore szűrőn (0,22 μm) keresztül szállította az üvegcsövekbe egy Discofix multifunkciós csapon (Braun) át, 12 cm-es tűk (Braun) segítségével. A steril légáramlást egy 1 mm-es nyílás biztosította a fedélen, amit Micropore sebészeti szalaggal (3M) fedtünk le a szennyeződések elkerülése érdekében. A világítást egy LED-es fénypanel (EGLO Zigbee) biztosította, amelyet az üvegcsövek aljára helyeztünk, és amelynek spektruma és intenzitása szabályozható volt, biztosítva ezzel a fotoszintetizáló algák számára optimális fényviszonyokat (3A ábra).

Az üvegcsöveket a fedelekkel és a grafitrudakkal együtt sterilizáltuk autoklávozással, az Ag/AgCl elektródákat UV-fénnyel sterilizáltuk 30 percig.

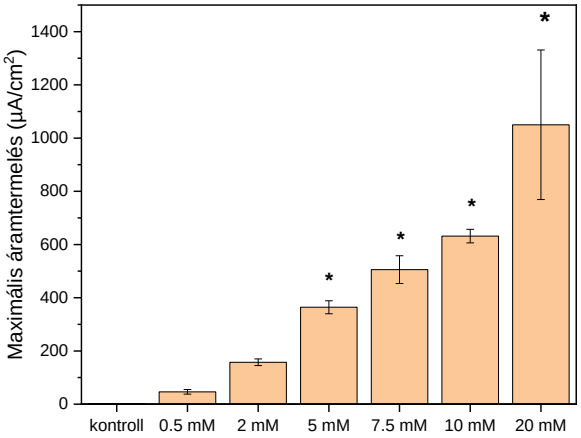
4.2. Optimális FeCN koncentráció meghatározása

A BPV rendszer optimalizálásában kulcsfontosságú lépés a redoxi mediátor megfelelő koncentrációjának kiválasztása, amely lehetővé teszi a maximális elektromos áramtermelést amellett, hogy a sejtek növekedésére és életképességére gyakorolt káros hatása minimális marad. Ennek érdekében a *P. kessleri* MACC-38 áramtermelését folyamatos mérsékelt fényben, 0,5, 2, 5, 7,5, 10 és 20 mM FeCN-koncentrációk jelenlétében vizsgáltuk. Az így kapott áramértékeket az anódfelületre normalizáltuk, és áramsűrűségként mutattuk be.

FeCN hiányában a *P. kessleri* MACC-38 által termelt áramsűrűség mindössze 1,26 μA/cm^2 volt. Ezzel szemben a FeCN hozzáadásával az áramsűrűség meredeken növekedett, és a koncentráció függvényében különböző időpontokban érte el a maximumot (4.ábra). Magasabb FeCN-koncentráció esetén az áramjel hosszabb idő után stabilizálódott. A 20. órában rögzített értékeket maximális áramerősségi értékként rögzítettük (5.ábra).



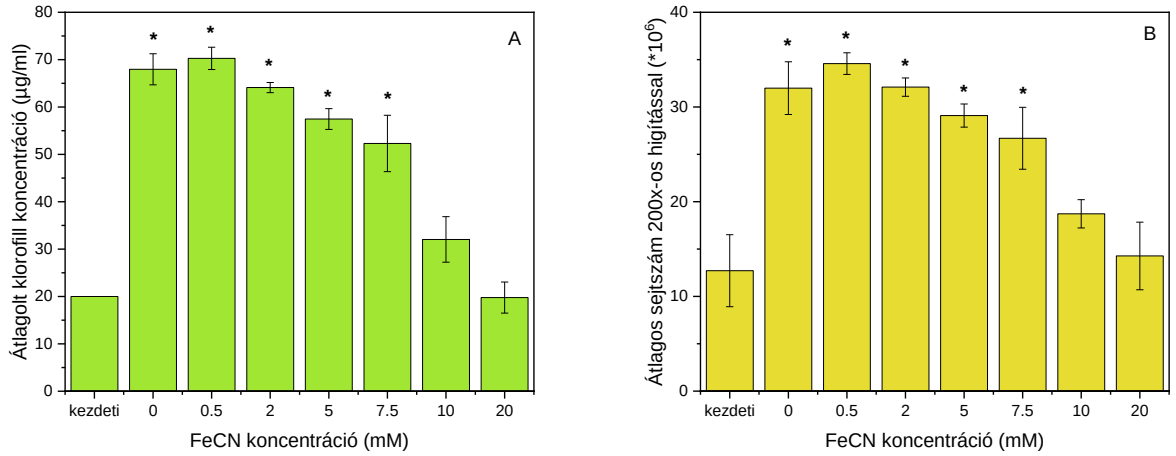
4. ábra A MACC-38 algatörzs reprezentatív kronoamperometriai görbéi, amelyeket 2 napon keresztül különböző FeCN-koncentrációk alkalmazásával rögzítettünk



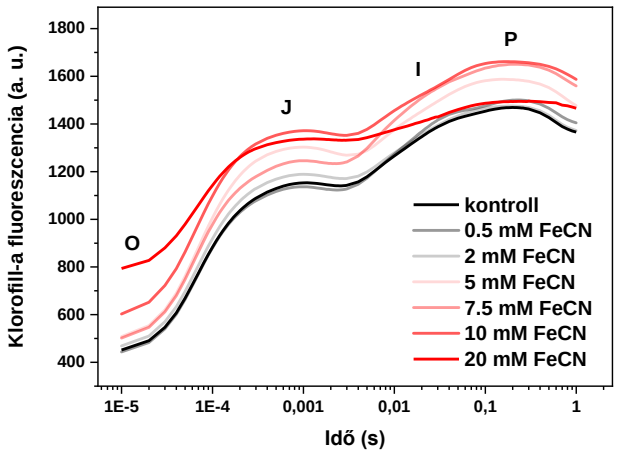
5. ábra A MACC-38 algatörzs maximális áramtermelése különböző FeCN-koncentrációk mellett. A csillagok a kontrollhoz viszonyított statisztikailag szignifikáns különbségeket jelzik ($p < 0,05$).

A mérések alapján a maximális áramsűrűség a FeCN-koncentráció növekedésével együtt emelkedett (5. ábra). A legnagyobb, 1 mA/cm^2 áramsűrűséget 20 mM FeCN koncentrációnál mértük (4.ábra). Annak ellenőrzésére, hogy az áramtermelés növekedését nem a FeCN és a TAP közegben található sók kölcsönhatásából származik, kronoamperometriás méréseket végeztünk a TAP közegben található 10 mM FeCN oldattal. A FeCN-ból eredő áram elhanyagolható volt (0,157 µA/cm^2), így megerősíthető, hogy az áramnövekedés forrása valóban a *P. kessleri* MACC-38.

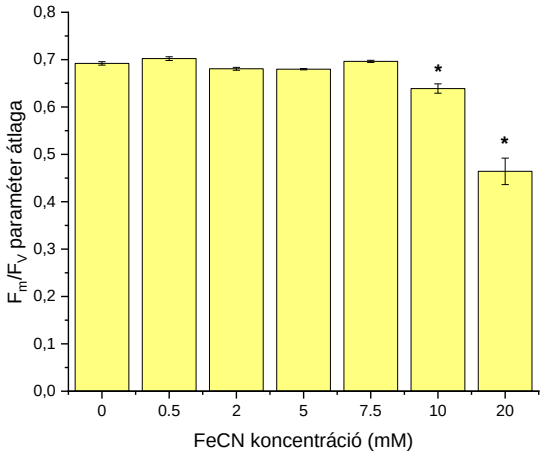
A különböző FeCN-koncentrációk sejtnövekedésre gyakorolt hatását úgy értékeltük, hogy meghatároztuk a klorofillkoncentrációt és a MACC-38 sejtsűrűségét két napos áramtermelést követően, folyamatos megvilágítás mellett. Az eredmények szerint a FeCN-koncentrációk 7,5 mM-ig nem okoztak szignifikáns csökkenést sem a klorofilltartalomban, sem a sejtszámban a kontrollhoz (FeCN nélküli) képest (6. ábra). Azonban a 10 és 20 mM FeCN-koncentráció jelentős változásokat idézett elő: a klorofillkoncentráció 53%-kal, illetve 72%-kal volt alacsonyabb a kontrollhoz viszonyítva (6A ábra), míg a sejtszám szintén drasztikusan csökkent, 41%-kal, illetve 56%-kal (6B ábra).



6. ábra Az MACC-38 algatörzs átlagos klorofill koncentrációja (A) és sejtszáma(B), különböző FeCN koncentrációk függvényében kétnapos áramtermelés után. A csillagok a kontrollhoz viszonyított statisztikailag szignifikáns különbségeket jelzik ($p < 0,05$).



7. ábra Az MACC-38 algatörzs Kl-a fluoreszcencia-indukciós görbéi, különböző FeCN koncentrációk függvényében, kétnapos áramtermelés után.

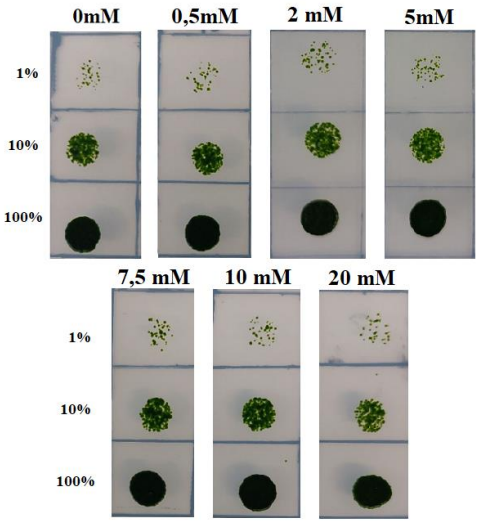


8. ábra Az MACC-38 algatörzs átlagolt F_v/F_m paraméterei, különböző FeCN koncentrációk függvényében, kétnapos áramtermelés után. A csillagok a kontrollhoz viszonyított statisztikailag szignifikáns különbségeket jelzik ($p < 0,05$).

A *P. kessleri* MACC-38 élettani állapotának további vizsgálatához különböző FeCN-koncentrációk melletti folyamatos áramtermelés hatását elemeztük Kl-a fluoreszcencia indukciós (OJIP) görbével (7. ábra). Az OJIP görbék alapján kiszámítottuk az F_v/F_m paramétert

is, amely a fotoszintetizáló szervezetek élettani állapotának széles körben használt indikátora (8. ábra).

Az 5–10 mM FeCN-koncentráció között a J-fázis amplitúdója megnőtt, és a maximális fluoreszcencia (P-fázis) is magasabb volt. A 10–20 mM-os FeCN-koncentráció drasztikusan megnövelte a kezdeti fluoreszcenciaszintet (O-fázis), ami az elektrontranszportlánc redukciós állapotának fokozódását és a fotoszintetikus apparátus visszafordíthatatlan károsodását mutatta. Az F_v/F_m paraméter 7,5 mM FeCN-koncentrációig stabil maradt (8. ábra), ám 10 mM FeCN esetén 7%-os, 20 mM FeCN esetén pedig 33%-os csökkenést tapasztaltunk.



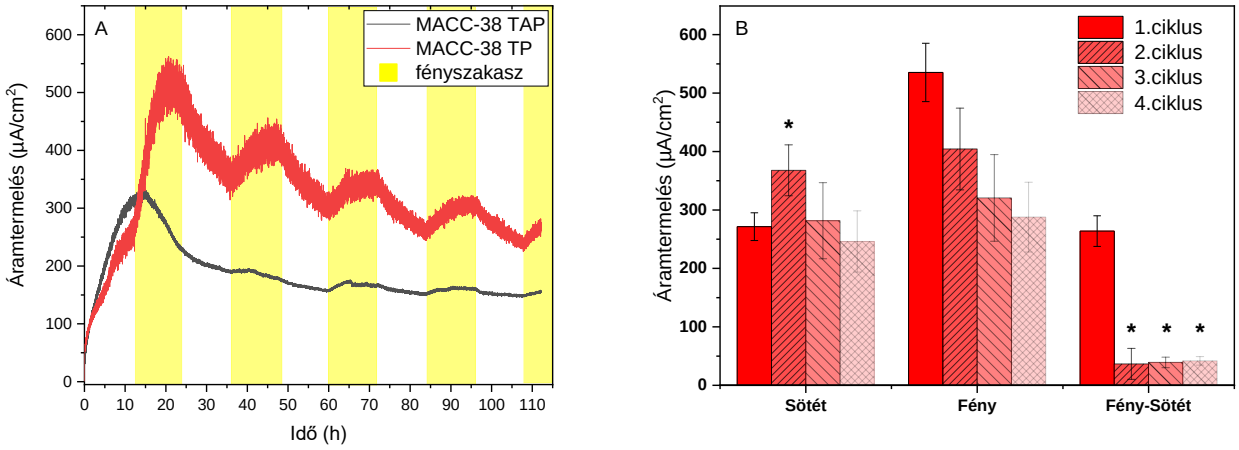
9.ábra MACC-38 sejtek mérés utáni növekedési képességének vizsgálata, 10 µl 1 (100%); 0,1 (10%) és 0,01 (1%) µg klorofill koncentrációjú sejtszuszpenziókkal.

Az áramtermelésre használt sejtkultúrákat a termelés után 5 napig szilárd TAP közegben tenyésztettük (9. ábra). A vizsgálat azt mutatta, hogy a FeCN-tól megtisztított sejtek koncentrációtól függeten hasonló növekedésre képesek.

Összefoglalva, bár a maximális elektromos áramkimenet növekszik a FeCN-koncentrációval, 7,5 mM feletti koncentrációk a sejtek növekedésére már káros hatással lehetnek. Ennek alapján a további kísérletekhez 7,5 mM FeCN-koncentrációt választottuk.

4.3. Nap-éj ciklus kivitelezése

A következőkben megvizsgáltuk, hogy a MACC-38 algatörzs BPV rendszer hogyan teljesít természetes fényviszonyokhoz hasonló körülmények között. Ehhez 12/12 órás nappali/éjszakai ciklusok áramtermelésre gyakorolt hatását elemeztük 60 µmol foton m^{-2} s^{-1} mérsékelt fényintenzitás mellett. Mivel a táptalaj összetétele jelentősen befolyásolhatja mind a sejtnövekedést, mind a BPV rendszer fenntarthatóságát, valamint gazdaságosságát, kétféle körülményt teszteltünk: a fotomixotróf nevelést TAP táptalajban, amely szerves szénforrást tartalmaz, és a fotoautotróf növekedést TP táptalajban, amelyben nincs szénforrás.



10. ábra A A MACC-38 algatörzs reprezentatív kronoamperometriai görbéi, amelyeket 5 napon keresztül TAP illetve TP közegben rögzítettünk sötét-fény ciklusok során(A), mellette a TP közegben nevelt algakultúra fény- és sötétszakasz áramtermelési értékeit összehasonlító ábra(B). A csillagok a kontrollhoz viszonyított statisztikailag szignifikáns különbségeket jelzik ($p < 0,05$).

A kronoamperometriás méréseket 12 órás sötét periódussal kezdtük, ami alatt mind a fotomixotróf, mind a fotoautotróf körülmények között emelkedett az elektromos áramjel (10A. ábra). Meglepő módon az áramtermelés TAP közegben alacsonyabb maximális értéket (365 µA/cm²) mutatott a TP közegben lévőhöz képest, emellett ezt a maximumot az első sötét fázis végén érte el. Ezt követően áramcsökkenés volt tapasztalható, amely a 48 óra után 160 µA/cm² körüli platót ért el (10A. ábra). Ezáltal a TAP közegben növesztett sejteknél a fényre adott válasz elhanyagolható volt. Ezzel szemben a TP közegben nevelt sejteknél a fény jelentős áramtermelést indukált az első és az azt követő fényciklusok során.

A fény és a sötét fázis áramtermeléséi értékei közötti különbség számszerűsítésével (9B. ábra) megállapítottuk, hogy a TP közegben nevelt sejteknél az első fényfázis során mért maximális áramtermelés (535 μA/cm²) megegyezett a rövid távú mérések során kapott értékekkel (Petrova et al., 2024). A TP közegben mért áramtermelés fény-sötétszakasz különbsége az első ciklusban volt a legmagasabb, 260 μA/cm² értékkel. A megvilágítás hatására kiváltott áramtermelés a második fényfázisban jelentősen csökkent, (10B. ábra), amit a táptalajban lévő FeCN és más tápanyagok kimerülésének, illetve a hosszú ideig tartó áramtermelés során aktiválódó negatív visszacsatolási mechanizmusoknak tulajdonítunk.

5. Diszkusszió

A biofotovoltaikus rendszerek (BPV) a napenergia villamos energiává alakításával egy környezetbarát alternatívát kínálnak a fosszilis energiahordozókkal szemben, miközben csökkenti a környezetterhelést (Bateson et al., 2018). A BPV rendszerek nemcsak az energiatermelés szempontjából jelentősek, hanem lehetőséget adnak a fotoszintézis és az exoelektrogenezis alaposabb megismerése is (McCormick et al., 2011). E a folyamatok, illetve a használt algatörzs mélyreható élettani és genetikai vizsgálata a fotoszintetikus folyamatok és a BPV rendszerek hatékonyságának növelését eredményezheti (Longatte et al., 2018). Hosszú távon a BPV rendszerek decentralizált energiatermelő megoldásokat kínálhatnak. Kis energiaigényű eszközök, például érzékelők és mikroprocesszorok hosszútávú energiaellátására már most is vannak kísérleti alkalmazások (Bombelli et al. 2022). A technológa további fejlődésével felhazsnálhatóvá válhat energiatakarékos épületek kialakításához és új lehetőségeket nyithatnak meg az energiatárolás és a megújuló technológiák kombinációja terén is (Longatte et al., 2018).

Kutatásaink során sikeresen megterveztünk és optimalizáltunk egy biofotovoltaikus rendszert, amely a *P. kessleri* MACC-38 zöldalga használatán alapul. Erre az algatörzsre már korábban is felfigyeltek kiemelkedő biomassza-hozamának és áramtermelésének köszönhetően (Petrova et al.; 2024). A korábbi rendszerhez képest jelentősen megnöveltük a térfogatot (100 µl-ről 80 ml-re), valamint az áramtermelés időtartamát (max. 1 óráról több napra). A háromelektródás BPV rendszer kialakítása stabil és többnapos áramtermelést tett lehetővé, miközben steril és kontrollált körülményeket között. A rendszer hatékonyságát befolyásoló tényezők közül az elektronmediátor-koncentráció és fény-sötét ciklus hatását vizsgáltuk részletesen.

A *Parachlorella kessleri* MACC-38 algatörzs kiemelkedő eredményeket mutatott BPV rendszerünk alkalmazása során. Petrova és munkatársai már korábban kiemelték, hogy ez az algatörzs tízszer nagyobb maximális áramsűrűséget ért el, mint a széles körben használt *Chlamydomonas reinhardtii* különböző törzsei (Petrova et al., 2024). Kutatásunk során a legnagyobb, 1 mA/cm2 áramsűrűséget 20 mM FeCN koncentrációnál mértük (4.ábra), amely példátlanul magas érték a BPV rendszerek területén, és ilyen magas értéket korábban még nem jelentettek (Wroe et al., 2024). Az algatörzs ezen kiemelkedő tulajdonságai új lehetőségeket nyitnak meg az alternatív energiaforrások alkalmazásának területén (Petrova et al., 2024).

Egy másik jelentős tulajdonsága az MACC-38 algatörzsnek, hogy FeCN mediátor jelenlétében is képes napokig megőrizni életképességét, emellett stabil áramtermelésre képes. Bár más algatörzsek, például a *Chlamydomonas reinhardtii* és a *Synechocystis* sp. szintén működőképesek mediátorok jelenlétében, az MACC-38 esetében a FeCN alkalmazása magasabb koncentráció mellett is biztosítja a hatékony áramtermelést. Ez különösen fontos előnyt jelent, mivel a mediátorok toxicitása gyakran korlátozó tényező a BPV rendszerekben.

Ebből is következik, hogy a BPV rendszerek hatékonysága nagymértékben függ a mediátor koncentrációjától. A méréssorozatunk alapján 2 mM FeCN-koncentrációig nem mutatkoztak jelentős változások az OJIP görbék alakjában (8. ábra), ami azt jelzi, hogy a FeCN és az áramtermelés ebben a koncentrációban nem gátolja a MACC-38 fotoszintetikus aktivitását. Az 5–10 mM FeCN-koncentráció között a J-fázis amplitúdója megnőtt, ami a kloroplasztiszban található plasztokinon-készlet magasabb redukáltsági fokát jelzi. 10 mM FeCN esetén 7%-os, 20 mM FeCN esetén pedig 33%-os csökkenést tapasztaltunk a fotoszintetikus hatékonyságban, kismértékű, illetve jelentősebb károsodásra utal. Ezt a károsodást a klorofilltartalom és a sejtszám csökkenése is megerősítette (6. A és B ábra).

Az eredmények alapján 7,5 mM FeCN mellett érhető el a legmagasabb áramsűrűség (505 μA/cm²) anélkül, hogy a sejtek életképességében jelentős mértékű károsodást tapasztaltunk volna. Eredményeink összhangban állnak McCormick és munkatársai (2011) megállapításaival, akik hasonló koncentrációnál mérték a legjobb teljesítményt (McCormick et al., 2011).

A *P. kessleri* MACC-38 regenerációs képessége szintén figyelemre méltó. A kísérletek során a FeCN eltávolítását követően a sejtek szilárd TAP táptalajon növekedtek, ami azt mutatja, hogy a törzs koncentrációtól függetlenül képes volt visszanyerni osztódóképességét (9. ábra).

Az optimális FeCN koncentráció megállapítása után a természetes környezethez hasonló feltételek modellezése érdekében 12/12 órás fény-sötét ciklust alkalmaztunk a BPV rendszerben 5 napon keresztül. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a *P. kessleri* MACC-38 algatörzs hosszabb távon is képes jelentős áramot termelni. Emellett megállapítottuk, hogy a TP táptalajban tartott fotoautotróf sejtek nagyobb áramtermelésre voltak képesek a fényfázisban (535 μA/cm²), mint a mixotróf, TAP tápoldatban tartott sejtek.

A TP táptalaj nem tartalmaz szerves szénforrást, ezáltal a sejtek kizárólag fotoszintézissel képesek energiát és áramot előállítani. Ez a körülmény fokozza a fotoszintetikus folyamatok hatékonyságát, hiszen más energiaforrás hiányában a sejtek minden erőforrásukat a fényenergia hasznosítására fordítják (Wey et al., 2019). A *P. kessleri* MACC-38 algatörzs által termelt áramsűrűség pedig kiemelkedő más algatörzsekhez és BPV rendszerekhez képest (*Synechocystis* sp.: Kusama et al. 2022; *Chlamydomonas reinhardtii*: McCormick et al. 2011).

Az áramtermelés első nap után észrevehető csökkenésre a táptalaj és mediátor kimerülése adhat okot. További kutatásainkban során ezért tervezzük, hogy a BPV-ben nevelt kultúrák tápoldatát az első fényfázis után friss TP-oldattal és FeCN-nel egészítjük ki, remélhetően biztosítva ezáltal a folyamatos és stabil áramtermelést.

Méréseink laboratóriumi körülmények között, viszonylag kis térfogatú BPV rendszerben történtek. Jövőbeli célunk a rendszer méretnövelése és az áramtermelés időtartamának meghosszabbítása, hogy igazolható legyen a technológia nagyobb léptékekben való alkalmazhatósága. Véleményünk szeribt az elektronmediátor és a tápoldat megfelelő pótlása jelentősen hozzájárulhat a hosszantartó, stabil működéshez. Emellezz szükséges lenne a rendszer nagyobb léptékű tesztelése természetes körülmények között. Ehhez következő lépésként megvizsgáljuk a váltakozó fényintenzitás (0-1000 μmól foton m -2 s -1) hatását az áramtermelésre.

A kutatás eredményei számos további vizsgálat alapját képezheti, ami a BPV rendszerek hatékonyságát és széles körű alkalmazhatóságát segítheti elő. Fontos lenne a jövőben feltárni az elektrontranszfer mechanizmusait, az elektronok exportálásának folyamatait, és azok a sejtek élettani folyamataira gyakorolt hatásait. Ezen ismeretek alapján mutáns törzseket lehetne előállítani, amelyek még alkalmasabbak lehetnek a BPV rendszerekben való felhasználáshoz. A kutatások egy másik iránya új elektronmediátorokat azonosítása, amelyek hatékonyabbak, illetve a sejtekre és a környezetre biztonságosak. Az ilyen és ehhez hasonló fejlesztéseknek köszönhetően a BPV rendszerek fenntarthatóbbá válhatnak, és új lehetőségeket kínálhatnak a decentralizált és autonóm energiatermelés területén.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani témavezetőimnek, Dr. Nia Petrovának és Dr. Tóth Szilvia Zitának, akik szakmai tapasztalatukkal, tudásukkal és tanácsaikkal segítették TDK dolgozatom elkészülését, és köszönöm támogatásukat a munkám során.

Külön köszönet korábbi témavezetőmnek, Dr. Tóth Tündének, akivel megkezdtük a BPV rendszerr kialakítását.

Köszönetet szeretnék mondani az egész Molekuláris Fotobioenergetikai Csoportnak, hogy tanácsokkal és szakmai tapasztalatokkal segítettek a munkám során.

7. Irodalomjegyzék

Allen, M. D., Del Campo, J. A., Kropat, J., & Merchant, S. S. (2007). FEA1, FEA2, and FRE1, encoding two homologous secreted proteins and a candidate ferrireductase, are expressed coordinately with FOX1 and FTR1 in iron-deficient *Chlamydomonas reinhardtii*. *Eukaryotic Cell*, *6*(10). https://doi.org/10.1128/EC.00205-07

Anderson, A., Bothwell, J. H., Laohavisit, A., Smith, A. G., & Davies, J. M. (2011). NOX or not? Evidence for algal NADPH oxidases. *Trends in Plant Science*, *16*(11), 579–581. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.003

Anderson, A., Laohavisit, A., Blaby, I. K., Bombelli, P., Howe, C. J., Merchant, S. S., Davies, J. M., & Smith, A. G. (2016). Exploiting algal NADPH oxidase for biophotovoltaic energy. *Plant Biotechnology Journal*, *14*(1), 22–28. https://doi.org/10.1111/pbi.12332

Antonucci, A., Reggente, M., Roullier, C., Gillen, A. J., Schuergers, N., Zubkovs, V., Lambert, B. P., Mouhib, M., Carata, E., & Dini, L. (2022). Carbon nanotube uptake in cyanobacteria for near-infrared imaging and enhanced bioelectricity generation in living photovoltaics. *Nature Nanotechnology*, *17*(10), 1111–1119. https://www.nature.com/articles/s41565-022-01198-x

Bateson, P., Fleet, J. E. H., Riseley, A. S., Janeva, E., Marcella, A. S., Farinea, C., Kuptsova, M., Conde Pueyo, N., Howe, C. J., & Bombelli, P. (2018). Electrochemical characterisation of bio-bottle-voltaic (BBV) systems operated with algae and built with recycled materials. *Biology*, *7*(2), 26. https://www.mdpi.com/2079-7737/7/2/26

Benitez, C. (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. In *Biochimica et Biophysica Acta* (Vol. 975). Springer-Verlag.

Bombelli, P., Savanth, A., Scarampi, A., Rowden, S. J. L., Green, D. H., Erbe, A., Årstøl, E., Jevremovic, I., Hohmann-Marriott, M. F., Trasatti, S. P., Ozer, E., & Howe, C. J. (2022). Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy & Environmental Science*, *15*(6), 2529–2536. https://doi.org/10.1039/D2EE00233G

Clifford, E. R., Bradley, R. W., Wey, L. T., Lawrence, J. M., Chen, X., Howe, C. J., & Zhang, J. Z. (2021). Phenazines as model low-midpoint potential electron shuttles for photosynthetic bioelectrochemical systems. *Chemical Science*, *12*(9), 3328–3338. https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/sc/d0sc05655c

Effect of different irradiance levels on bioelectricity generation from algal biophotovoltaic (BPV) devices - Thong - 2019 - Energy Science & Engineering - Wiley Online Library. (n.d.). https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.414

Exploiting algal NADPH oxidase for biophotovoltaic energy - Anderson - 2016 - Plant Biotechnology Journal - Wiley Online Library. (n.d.). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbi.12332

Hasan, K., Grippo, V., Sperling, E., Packer, M. A., Leech, D., & Gorton, L. (2017). Evaluation of Photocurrent Generation from Different Photosynthetic Organisms. *ChemElectroChem*, *4*(2). https://doi.org/10.1002/celc.201600541

Hill, K. L., Hassett, R., Kosman, D., & Merchant, S. (1996). Regulated copper uptake in *Chlamydomonas reinhardtii* in response to copper availability. *Plant Physiology*, *112*(2). https://doi.org/10.1104/pp.112.2.697

Horváth, Á. N., Németh, L., Vörös, L., Stirk, W. A., van Staden, J., & Ördög, V. (2023). Cataloguing microalgae and Cyanobacteria strains from the Mosonmagyaróvár Algal Culture Collection with in vitro antagonistic activity against phytopathogenic fungi and oomycetes. *Phytoparasitica*, *51*(4). https://doi.org/10.1007/s12600-023-01045-2

J. McCormick, A., Bombelli, P., W. Bradley, R., Thorne, R., Wenzel, T., & J. Howe, C. (2015). Biophotovoltaics: oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science*, *8*(4), 1092–1109. https://doi.org/10.1039/C4EE03875D

Kusama, S., Kojima, S., Kimura, K., Shimakawa, G., Miyake, C., Tanaka, K., Okumura, Y., & Nakanishi, S. (2022). Order-of-magnitude enhancement in photocurrent generation of Synechocystis sp. PCC 6803 by outer membrane deprivation. *Nature Communications*, *13*(1), 3067. https://www.nature.com/articles/s41467-022-30764-z

Longatte, G., Sayegh, A., Delacotte, J., Rappaport, F., Wollman, F.-A., Guille-Collignon, M., & Lemaître, F. (2018). Investigation of photocurrents resulting from a living unicellular algae suspension with quinones over time. *Chemical Science*, *9*(43), 8271–8281. https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/sc/c8sc03058h

McCormick, A. J., Bombelli, P., Scott, A. M., Philips, A. J., Smith, A. G., Fisher, A. C., & Howe, C. J. (2011). Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energy & Environmental Science*, *4*(11), 4699–4709. https://doi.org/10.1039/C1EE01965A

Ng, F.-L., Phang, S.-M., Periasamy, V., Yunus, K., & Fisher, A. C. (2014). Evaluation of Algal Biofilms on Indium Tin Oxide (ITO) for Use in Biophotovoltaic Platforms Based on Photosynthetic Performance. *PLOS ONE*, *9*(5), e97643. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097643

Petrova, N. Z., Tóth, T. N., Shetty, P., Maróti, G., & Tóth, S. Z. (2024). Enhancing biophotovoltaic efficiency: Study on a highly productive green algal strain Parachlorella kessleri MACC-38. *Bioresource Technology*, *394*, 130206. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130206

Rosenbaum, M., Aulenta, F., Villano, M., & Angenent, L. T. (2011). Cathodes as electron donors for microbial metabolism: Which extracellular electron transfer mechanisms are involved? In *Bioresource Technology* (Vol. 102, Issue 1). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.008

Sagi, M., Davydov, O., Orazova, S., Yesbergenova, Z., Ophir, R., Stratmann, J. W., & Fluhr, R. (2004). Plant respiratory burst oxidase homologs impinge on wound responsiveness and development in Lycopersicon esculentum. *The Plant Cell*, *16*(3), 616–628. https://academic.oup.com/plcell/article-abstract/16/3/616/6010342

Saper, G., Kallmann, D., Conzuelo, F., Zhao, F., Tóth, T. N., Liveanu, V., Meir, S., Szymanski, J., Aharoni, A., Schuhmann, W., Rothschild, A., Schuster, G., & Adir, N. (2018). Live cyanobacteria produce photocurrent and hydrogen using both the respiratory and photosynthetic systems. *Nature Communications*, *9*(1), 2168. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04613-x

Sayegh, A., Perego, L. A., Arderiu Romero, M., Escudero, L., Delacotte, J., Guille-Collignon, M., Grimaud, L., Bailleul, B., & Lemaître, F. (2021). Finding Adapted Quinones for Harvesting

Electrons from Photosynthetic Algae Suspensions. *ChemElectroChem*, *8*(15), 2968–2978. https://doi.org/10.1002/celc.202100757

Shlosberg, Y., Eichenbaum, B., Tóth, T. N., Levin, G., Liveanu, V., Schuster, G., & Adir, N. (2021a). NADPH performs mediated electron transfer in cyanobacterial-driven bio-photoelectrochemical cells. *IScience*, *24*(1). https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101892

Shlosberg, Y., Eichenbaum, B., Tóth, T. N., Levin, G., Liveanu, V., Schuster, G., & Adir, N. (2021b). NADPH performs mediated electron transfer in cyanobacterial-driven bio-photoelectrochemical cells. *IScience*, *24*(1). https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101892

The Development of Biophotovoltaic Systems for Power Generation and Biological Analysis - Wey - 2019 - ChemElectroChem - Wiley Online Library. (n.d.). https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/celc.201900997

Tschörtner, J., Lai, B., & Krömer, J. O. (2019). Biophotovoltaics: Green power generation from sunlight and water. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Issue APR). https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00866

Weger, H. G., & Espie, G. S. (2000). Ferric reduction by iron-limited Chlamydomonas cells interacts with both photosynthesis and respiration. *Planta*, *210*(5). https://doi.org/10.1007/s004250050679

Wey, L. T., Lawrence, J. M., Chen, X., Clark, R., Lea-Smith, D. J., Zhang, J. Z., & Howe, C. J. (2021). A biophotoelectrochemical approach to unravelling the role of cyanobacterial cell structures in exoelectrogenesis. *Electrochimica Acta*, *395*, 139214. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139214

Wroe, E. I., Egan, R. M., Willyam, S. J., Shang, L., & Zhang, J. Z. (2024). Harvesting photocurrents from cyanobacteria and algae. In *Current Opinion in Electrochemistry* (Vol. 46). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101535

A 37. OTDK
BIOLÓGIA SZEKCIÓ FELHÍVÁSÁNAK
2. SZÁMÚ MELLÉKLETE

TÉTELES SZERZŐI HOZZÁJÁRULÁS

Alulírott **Kőházi-Kis Anna** nyilatkozom, hogy a 37. OTDK-ra benyújtott **Biofotovoltaikus rendszer tervezése és optimalizálása Parachlorella kessleri MACC-38 algatörzs alkalmazásával** című pályamunkámban leírtak esetében az alábbi munkafolyamatok elvégzésében vettem részt[1]:

Részfeladat	**A részvétel mértéke (ötfokozatú skálán# jellemezve)**
Algakultúrák tenyésztése	*2*
A vizsgálandó algakultúra előkészítése	*5*
BPV rendszer tervezése, kivitelezése	*3*
BPV rendszer előkészítése, összeállítása a méréshez	*5*
Az adatok statisztikai feldolgozása, kiértékelése	*4*
...	...

Kelt: 2024.11.07

Kőházi-Kis Anna

Pályamunkát benyújtó hallgató
(*Kőházi-Kis Anna*)
aláírása

Kétszerzős pályamunka esetén:

Társszerző (*név*)
aláírása

A nyilatkozatban foglaltak helyességét megerősítem:

Petrova Nia Tóth Szilvia

Témavezetők *(Dr. Nia Petrova, HUN-REN SZBK, Dr. Tóth Szilvia Zita, HUN-REN SZBK)*
aláírása

[1] A kutatási projekt azon részfeladatait, amelyekben egyáltalán nem vett részt, ne tüntesse fel a listában.