



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

***CHLORELLA VULGARIS* MIKROALGA KÖRNYEZETTECHNOLÓGIAI
ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA**

DOKTORI (*PhD*) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

FEKETE GYÖRGY

Gödöllő

2025

A doktori iskola

megnevezése: MATE Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Környezettudományok

vezetője: Csákiné Dr. Michéli Erika
intézetigazgató, egyetemi tanár, az MTA doktora *DSc*
MATE, Szent István Campus
Környezettudományi Intézet
Talajtani Tanszék

Témavezetők: Dr. Aleksza László
kihelyezett tanszékvezető, egyetemi docens
MATE, Szent István Campus
Környezettudományi Intézet
Környezetanalitikai és Környezettechnológiai Tanszék

Dr. Czinkota Imre
nyugalmazott egyetemi docens
MATE, Szent István Campus
Környezettudományi Intézet
Talajtani Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
.....
A témavezetők jóváhagyása

A munka előzményei, célkitűzések

A légkör szén-dioxid (CO₂) koncentrációja az 1700-as években 280 ppm-ről induló szintjéről mára 427 ppm-re nőtt, ami olyan súlyos következményekkel jár, mint például a tengerszint-emelkedése, a szélsőséges időjárási események egyre gyakoribb és egyre extrémebb mértékű előfordulása, valamint a globális klímaváltozás kedvezőtlen hatásai. Az Európai Unió klímasemlegességi célkitűzései között szerepel a megújuló energiaforrások felhasználásának növelése, valamint olyan innovatív technológiák kidolgozása, mint például a különböző CO₂-megkötési és -hasznosítási megoldások. A mikroalga-alapú CO₂-megkötés ígéretes megoldás lehet az emisszió csökkentésére. Az algák gyors növekedési ütemük és magas fotoszintetikus hatékonyságuk révén idő- és területegységre nézve lényegesen több CO₂-t képesek elnyelni, mint a szárazföldi növények. Az algaalapú-módszerek alkalmazása nemcsak környezetbarát, de gazdasági szempontból is előnyös lehet, mivel értékes melléktermékek képződésével járhat együtt, így a mikroalgák alkalmazása nem csupán a CO₂-megkötés problémájára kínál megoldást, hanem új lehetőségeket nyújt a bioüzemanyagok, műtrágyák és más ipari termékek fenntartható előállításában. A mikroalga-alapú CO₂-megkötési rendszerek számos előnye ellenére az alkalmazásuk során számottevő technológiai és gazdasági kihívással kell szembenéznünk.

A disszertációmban két modellkísérlet eredményeit mutatom be, amelyek közös célja, hogy elősegítsék a mikroalgák alkalmazását a különböző környezettechnológiák területén, különös tekintettel a CO₂ csökkentési technikákra. Az első tanulmány fő célkitűzése egy egyszerű, gyors és alacsony erőforrásigényű algabiomassza becslési módszer kidolgozása volt. A vizsgálatok során a széleskörben kutatott *Chlorella vulgaris* algafaj biomasszájának mennyiségi meghatározására alkalmas és széles körben elterjedt módszerek, illetve paraméterek (pl. magnézium-tartalom, klorofill-a-tartalom és algasejtszám) alkalmazhatóságát vizsgáltam, továbbá hasonlítottam össze. Az első modellkísérletben így hat különböző laboratóriumi módszer UV-VIS spektrofotometriás eljárással történő korrelációját vizsgáltam egy koncentrált *C. vulgaris* törzsoldatból készített hígítási sorozat tagjain elvégzett párhuzamos mérések eredményei alapján. A kísérlet célja az volt, hogy meghatározzam azt az optimális hullámhosszt, amelyen az optikai sűrűség a legszorosabb összefüggést mutatja az algabiomasszával jellemző további paraméterekkel. A szakirodalomban a klorofillpigmentek spektrumán mérhető ajánlott hullámhosszok igen széles tartományt fednek le, ezért a pontos hullámhossz azonosításához korreláció pásztázást alkalmaztam, aminek a lényege, hogy az egyes hullámhosszokon mért optikai sűrűség adatokat lineáris regresszióval korreláltattam a hígítási sorozat különböző tagjain mért további laborparaméterekkel (pl. sejtszám, szárazanyag-tartalom, klorofill-a-koncentráció).

A második modellkísérlet célja a *C. vulgaris* szénfelvevő képességének vizsgálata volt. Az elválasztott rendszerű mikroalga-alapú CO₂-megkötési eljárást modellezve mosóközegként fa biomassza égetéséből származó hamu vizes kivonatát alkalmaztam. A választott alapanyag globálisan elterjedt és fenntartható, így használata hozzájárulhat a körforgásos gazdasági modell alapvető célkitűzéseinek eléréséhez. Az első lépésben a hamukivonat füstgáz-tisztító képességét vizsgáltam, amely során modell füstgázt alkalmaztam. A CO₂ gázpalackból egy diffúzoron keresztül juttattam be a gázt finom buborékok formájában a hamu vizes kivonatába, miközben nyomon követtem a pH-érték változását. A kísérlet egy másodlagos célkitűzése egy új módszer kidolgozása volt az oldott szervetlen széntartalom mérésére az OxiTop respirométer alkalmazásával.

Anyag és módszer

A *Chlorella vulgaris* törzstenyészet fenntartása

A modellezési kísérleteim során egy *C. vulgaris* törzstenyészetet használtam tesztorganizmusként. Az alkalmazott egysejtű zöldalga (*Chlorella vulgaris* Beijerinck, CCAP 211/11b) a prágai Károly Egyetem Algagyűjteményéből (Prága, Csehország) származik, majd a tenyészetek fenntartása Scharlau *Algae Broth* megnevezésű (Art. No. 02-007) tápsó oldatban (Scharlab csoport, Barcelona, Spanyolország) valósult meg. A kiválasztott algafaj laboratóriumi körülmények között könnyen fenntartható, továbbá jól tolerálja a környezeti változásokat és a termesztési folyamat során megemelkedett CO₂-koncentrációt. A *C. vulgaris*-hoz kapcsolódóan igen széleskörű szakirodalom áll rendelkezésre, valamint a törzs iránti piaci kereslet is jelentős, amely tényezők fontos szerepet játszottak a modellszervezet kiválasztása során. A tápoldat összeállítása során a gyártói útmutatásoknak megfelelően 1,87 g tápsót adtam 1 liter algaszuszpenzióhoz, hogy 7–15 napon belül sötétzöld színt érjünk el. A tenyészetek fenntartása Erlenmeyer-lombikokban, meghatározott hőmérsékleten ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) és fényviszonyok (folyamatos megvilágítás, teljes spektrumú nappali fényt kibocsátó fénycsővek (Osram Biolux, T8 L30W/965 Daylight 6500K, 26 mm x 895 mm) mellett valósult meg.

Az algatenyészetek fenntartása során az Ördög Vince által leírt módszertan alapján titráló lombikokat használtam, amelyeket egy üvegpalcra helyeztem. Az üvegpalc alá kerültek a fénycsővek, annak érdekében, hogy a lombikok egyenletes megvilágítása biztosított legyen. A lombikok levegőztetését egy levegőpumpával (Hailea Co., Chaozhou, Kína) oldottam meg. A beáramló levegőt egy habkő segítségével oszlattam el mikrobuborékokra, ami biztosította a tápközeg hatékony oxigénellátását. Mielőtt a levegő a lombikokba jutott volna, egy 0,22 μm pórusméretű ($d=13\text{ mm}$) polivinil-difluorid fecskendőszűrőn keresztül szűrtem meg, ezzel biztosítva a steril és kontrollált kísérleti, illetve termesztési körülményeket.

Az alkalmazott algabiomassza meghatározási módszerek bemutatása

Az algabiomassza méréséhez használt módszerek során a törzstenyészetből, amelynek sejtkoncentrációja $1,08 \cdot 10^{11}$ sejt/L volt, hígítási sorozatot készítettem el: 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 és 1000-szeres hígításokkal. A leggyakrabban alkalmazott algabiomassza meghatározási módszerek összehasonlító értékelése során az UV–VIS spektrofotometriás módszert hat különböző módszerrel hasonlítottam össze. Az összehasonlító vizsgálatok során az algabiomassza mennyiségi meghatározását, így hét különböző mérési módszerrel végeztem el a különböző hígításokban.

Az összehasonlító vizsgálatok során alkalmazott módszerek a következők:

1. Szűrés
2. Bepárlás
3. Mg: Magnézium koncentráció meghatározása
4. klo-a: klorofill-a extrakció
5. Sejtszám: mikroszkópos sejtszámlálás
6. DFR: indukált klorofill-a fluoreszcencia meghatározása
7. OD: optikai sűrűség meghatározása spektrofotometriás módszerrel

A sejtszámolást a hígítási sorozat minden elemén négy ismételtsben végeztem el, hogy biztosítsam az eredmények reprezentativitást. Az UV–VIS spektrumokat a csekély eltérések miatt ($R^2 > 0,999$) csak két párhuzamos minta mérése alapján határoztam meg. A többi mérési módszer esetében, 3-3 ismételtsben végeztem el a méréseket a hígítási sor minden

tagján. A Mg-tartalom kivételével minden paramétert 24 órán belül lemértem, hogy elkerüljem a minták élő biológiai jellegéből adódó esetleges időbeli változásokat.

Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása

Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása során az algaszuszpenziókat olyan steril membránszűrőkön (Whatman 10401170, Maidstone, UK, cellulóz-nitrát membrán, pórusméret = 0,45 μm , d = 47 mm) szűrtem át, amelyeket előzőleg desztillált vízzel átmostam. A szűrést követően a szűrőlapokat kiszárítottam, majd lemértem. A kiszűrt algasejteket 105 °C-on 24 órán át szárítottam a szűrőpapírral együtt, majd analitikai mérlegen mértem le a közös tömegüket.

Az algabiomassza bepárlással történő meghatározása

A különböző hígítású algaszuszpenziókat mérőlombikokban rázatással homogenizáltam, majd három ismétlésben (3 $\times$ 40 ml) izzítótégelyekbe adagoltam. A tégelyeket 90 °C-on szárítószekrényben bepároltam tömegállandóságig, majd lemértem a visszamaradt tömeget. Minden egyes hígítás esetében 3-3 ismétlésben lemértem az algamentes oldat szárazanyag-tartalmát is. A szárazanyag-tartalom meghatározása során a mintákat 5000 fordulat/perc sebességgel 20 percen keresztül centrifugáltam (Ohaus Corporation, Parsippany, NJ, USA), majd a felülúszót szűrőpapíron (Whatman 10401170, pórusméret = 0,45 μm , d = 47 mm) átszűrtem, hogy eltávolítsam a maradék algasejteket, ezt követően a mintákat izzítótégelyekbe töltve 90 °C-on tömegállandóságig szárítottam szárítószekrényben. Az algamentes felülúszó folyadék fázis térfogategységre jutó átlagos visszamaradt tömegét három ismétlésben határoztam meg, majd levontam a centrifugálatlan, szintén bepárlással meghatározott algakoncentrációkból. Az oldott sótartalmat, amely potenciálisan a tápoldatból származhatott, így minden esetben levontam az összes visszamaradt száraztömegből, ezzel megkaptam a nettó algabiomassza tömeget.

Az algabiomassza meghatározása a magnéziumtartalom alapján

A magnéziumkoncentrációk meghatározása során a bepárlás után visszamaradt biomasszamintákat izzítószekrénybe helyeztem és 3 órán keresztül izzítottam 550 °C-on. A minta Mg tartalmát a hamuból savas hidrolízis módszerrel kivonatoltam, majd a koncentráció meghatározása mikrohullámú plazma atomemissziós spektrométerrel (4210 MP-AES, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) történt.

Az algabiomassza meghatározása a klorofill-a-koncentráció alapján

A hígítási sorozat minden egyes tagjában a Felföldy-féle módszer alkalmazásával a minták spektrofotometriás mérését követően határoztam meg a klorofill-a-koncentrációt. Első lépésként a mintákat szűrőpapíron (Whatman 10401170, pórusméret = 0,45 μm , d = 47 mm) szűrtem át, majd a szűrőpapírt eltávolítottam a szűrőtölcsérből, ezután összehajtottam és ollóval vékony csíkokra vágtam. A szűrőpapírcsíkokat ezt követően centrifugacsövekbe helyeztem és 10-10 mL metanolt adtam hozzá. A centrifugacsöveket vízfürdőre helyeztem, majd az elegyet az első forráspontig (74°C) melegítettem. A vízfürdős melegítést követően a mintákhoz további 10-10 mL metanolt adagoltam. A kioldási folyamat után a kivont klorofill-a-tartalmat a mintamátrixból centrifugálással (4700 fordulat/perc, 20 perc) különítettem el. A spektrofotometriás elemzés során a felülúszó optikai denzitását különböző hullámhosszokon (750, 666 és 653 nm) Jenway 6405 UV-VIS spektrofotométer (Cole-Parmer Instrument Co., Neots, UK) használatával végeztem el. A minták klorofill-a-tartalmát a Felföldy-képlet segítségével határoztam meg.

Az algabiomassza meghatározása a minták sejtszáma alapján

A hígítási sorozat különböző tagjaiból származó algamintákat két ismétlésben kémcsövekbe adagoltam. Minden vizsgált mintáról két-két képet készítettem egy BTC BIM 105M mikroszkóppal (Castell Nova Kft., Sopron, Magyarország), amelyhez egy MicroQS 2 megapixeles SPCMOS02000KPA mikroszkópkamerát (Micro Q Inc., San Diego, CA, USA) csatlakoztattam, 100-szoros nagyítással. Az eredményeket négy ismétlésből származó képfeldolgozás átlagolásával nyertem, hogy biztosítsam a módszer pontosságát és megbízhatóságát. A sejtek számát Bürker-számlálókamra (Marienfeld-Superior, Lauda-Königshofen, Németország) segítségével határoztam meg. Minden mikroszkópos képből egy 0,64 mm² területet vágtam ki digitálisan a részletes képelemzést és sejtszámlálást megelőzően. A képkivágást előzetesen a számlálókamra ismert hosszúságú éleihez igazítva végeztem el, majd miután meghatároztam, hogy az egységnyi terület 1110 x 1110 pixelből áll, ezt a méretet véletlenszerűen vágtam ki a digitális mikroszkópképből. Ismerve a Bürker-kamra 0,1 mm-es mélységét, az egységnyi vizsgált felület egy 0,064 mm³ térfogatú szuszpenzió sejtszámlálására biztosított lehetőséget.

Az egységnyi képrészletből a sejtek számát az *ImageJ* képfeldolgozó szoftver (szoftver verziószám: 1.50i) segítségével állapítottam meg, miután elvégeztem a képfeldolgozási lépéseket a mikroszkópos képeken. Először egy háttér korrekciós folyamatot alkalmaztam világos háttérrel, majd a képeket 8 bitesre konvertáltam és küszöbérték-beállítást hajtottam végre, hogy fokozzuk a kontrasztot, illetve fekete-fehér formátumba alakítsam át a képeket, 0 és 200 közötti küszöbérték tartománnyal. Az első három lépés a nem kívánt háttérzaj eltávolítását és az algasejtek láthatóságának javítását célozta az üvegfelületen. A képeken található részecskéket az „*Analyze particles*” (részecskék elemzése) parancs segítségével számoltattam meg, úgy, hogy csak a 6-150 pixeles méret közötti foltokat vegye figyelembe a szoftver. Az alkalmazott mérethatárt több tucat véletlenszerűen kiválasztott algasejt pixelszámlálása alapján határoztam meg, ezzel biztosítva, hogy csak a kívánt mérettartományon belüli sejteket számoljam meg, miközben figyelmen kívül hagyjam az esetlegesen előforduló, kisebb-nagyobb méretű szennyeződések.

Az algabiomassza meghatározása a gerjesztett klorofill-a fluoreszcencia mérése alapján

Az algaszuszenziók biomasszája a gerjesztett klorofill-a fluoreszcencia mérési módszer alapján is meghatározásra került a MATE Környezettudományi Intézetének Agrár-környezettudományi Kutatóközpontjának munkatársai segítségével. A fluoreszcencia mérések az Aquafluosense projekt (NVKP_16-1-2016-0049, konzorciumvezető: Prof. Dr. Székács András) keretein belül fejlesztett dikroikus fluorométer rendszer (*DFS*) prototípusának használatával lettek elvégezve. A kifejlesztett műszer az algasűrűség becslésére és összetételének elemzésére alkalmas a gerjesztett klorofill-a-fluoreszcencia mérése alapján. A mérések a műszerfejlesztésben résztvevő kutatócsoport által leírt és optimalizált módszer szerint lettek elvégezve, az így detektált fluoreszcens intenzitás relatív fluoreszcencia egységekben (*RFU*) került meghatározásra. A *DFS* olyan léptető motorral van felszerelve, amely lehetővé teszi a detektorfejek mozgását a 96-lyukú mikrolemezek lyukai felett, így az *RFU* meghatározása gyors és hatékony módon, valamint egyedileg is megvalósítható a mikrotálcák mintatartó lyukaiban. A fluoreszcens mérések során az *RFU*-értékeket a *DFS* 1. csatornája alapján mért eredmények alapján kerültek meghatározásra. Az alkalmazott a gerjesztési hullámhossz 630 nm, míg a detektálási hullámhossz 716 nm volt. A gerjesztett klorofill-a-fluoreszcencia mérések során egy LED lámpa szolgált fényforrásként.

Az algabiomassza meghatározása az optikai sűrűségének mérése alapján

A vizsgált algaszuszpenziók optikai sűrűségét 300–1100 nm hullámhossztartományban teljes spektrum pásztázással határoztam meg egy Jenway 6405 UV-VIS típusú spektrofotométerrel (Cole-Parmer Instrument Co., Neots, UK). A mért spektrumadatok rendkívül alacsony szórása miatt (a lineáris regressziós elemzés alapján: $R^2 > 0,999$) csak két ismételtsben végeztem el a méréseket a hígítási sorozat minden egyes tagjának esetében. A mérések során a vakként alkalmazott desztillált víz spektrumával korrigáltam az összes mért spektrumot úgy, hogy mindegyikből kivontam a vakra mért értékeket.

Az algabiomassza meghatározásra alkalmas módszerek eredményeinek statisztikai kiértékelése

Az analitikai mérések eredményeit a Microsoft Excel 2018-as verziójával (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) jelenítettem meg és elemeztem. A különböző módszerekkel mért algasűrűség-értékek és az egyes hullámhosszokon mért UV-VIS jelkülönbség közötti korrelációs együtthatók (R^2 -értékek) meghatározását egy újonnan fejlesztett módszerrel, az ún. korreláció pásztázással végeztem el. A korreláció pásztázást a teljes mért hullámhossz spektrumon a Dr. Czinkota Imre által Delphi-ben fejlesztett program (Borteres Delphi® 6.0, Microsoft® Windows 98® és magasabb operációs rendszerekhez) segítségével futtattam le. Az algoritmus által végzett számítás lényege, hogy a program lineáris regressziós elemzést végez a hígítási sorozat egyes tagjaiban mért koncentráció és az optikai sűrűség függvényre vonatkozóan az egyes hullámhosszokon külön-külön, majd a kapott R^2 -értékeket megadják az adott hullámhosszokon. A kapott függvények maximuma megadja a legerősebb korreláció mértékét és azt a hullámhosszt, ahol érdemes az adott paramétert spektrofotométerrel mérni.

A kapott maximum értékeken az optikai sűrűség és a koncentrációk közötti korrelációkat további statisztikai elemzésnek vetettem alá a Microcal Origin 6.0 program (MicroCal Software, Inc., Northampton, MA, USA) segítségével, amiben már nem csak lineáris korrelációkat tudtam felállítani, mint a pásztázás során, hanem a program beépített függvényeinek segítségével tovább tudtam finomítani a korreláció matematikai hátterét.

A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet bemutatása

A fabiomassza tüzelésből származó hamu kivonat előállítása

A választott *C. vulgaris* mikroalgafaj szénfelvételét vizsgáló modellkísérletben használt fahamu minta a Szakolyi Biomassza Erőmű szálló pernyéjéből származott. A laboratóriumban 1:10 arányú desztillált vízzel készült kivonatot (WBA) állítottam elő a fahamu mintából, majd 24 órás ráztatását követően az oldatot szűrőpapíron (Whatman No. 42, pórusméret = 0,25 μm) szűrtem át.

A modellkísérlet beállításai

Az előző fejezetben ismertetett extrakciós módszert alkalmazva, különböző WBA-tartalmú kezelések (0%, 10%, 25% és 50% WBA) hatásait vizsgáltam a *C. vulgaris* szénfelvételére. A kezelések hatásait 3-3 ismételtsben vizsgáltam, szobahőmérsékleten (25 ± 1 °C), 3 párhuzamos kontroll minta vizsgálatba vonása mellett. A kezelt és a kezeletlen kontroll kísérleti egységek pontos összetételét a 1. táblázat foglalja össze. Az optimális növekedéshez viszonyítható eredmények biztosítása érdekében az összes mintát egy időben indítottam el, azonos laboratóriumi körülmények között, standard tápsó oldat (Scharlau Algae Broth, Scharlab csoport, Barcelona, Spanyolország) alkalmazásával. A kísérletek

során a CO₂ gáz egy gázpalackból, diffúzor segítségével (ISTA Ceramic UFO CO₂ Diffuser, 25 mm korong) mikrobuborékok formájában jutott a mintákba. A CO₂ megkötési folyamat után minden minta pH-értékét az eredeti pH-ról 6,00±0,05-re állítottam be. Ha a minták több órán keresztül a laboratóriumban állnak, a desztillált víz képes megkötni a levegő CO₂ tartalmát, amelynek következtében enyhe szénsav képződik. Az így keletkező többlet széntartalom hatással lehet a modellkísérlet eredményeire, ezért ennek elkerülésének érdekében közvetlenül a kísérlet előtt a desztillált vizet felforraltam. A kísérletek során tehát forralt (majd szobahőmérsékletre visszahűtött) desztillált vizet alkalmaztam (pH=7,00). A növekedési teszt során a mintákat dugóval lezárt 500 mL-es Erlenmeyer-lombikokban helyeztem a megvilágított üvegpolcra.

1. táblázat: A modellkísérletben alkalmazott kontroll és különböző CO₂ és fabiomassza hamu-tartalmú kezelések kísérleti összeállítása

Kezelés	WBA kivonat mennyisége (mL/L)	Tápsó koncentráció (g/L)	Algatörzsszoldat koncentráció (mL/L)	Forralt deszt. víz koncentráció (mL/L)	CO ₂ kezelés
kontroll	-	1,87	5	995	-
0%	-	1,87	5	995	igen
10%	100	1,87	5	895	igen
25%	250	1,87	5	745	igen
50%	500	1,87	5	495	igen

A pH-értékek alakulásának nyomonkövetése

Az elvégzett modellkísérlet során, a kontroll és kezelt csoportokban 12 óránként digitális pH/mV-mérővel (OP-211/2, Radelkis Kft., Budapest, Magyarország) határoztam meg a pH-értékek alakulását. A kontroll és kezelt minták esetében mindhárom párhuzamosban meghatározásra került a pH-érték.

Az algabiomassza-koncentráció alakulásának nyomonkövetése

Az algabiomassza-koncentráció változásainak nyomonkövetése során az optikai sűrűség meghatározásán alapuló módszert alkalmaztam az első modellkísérletben megállapított összefüggés alapján. A mintavételezés a pH-méréshez hasonlóan, szintén 12 óránként valósult meg. A minták vizsgálatát spektrofotométer (Jenway 6405 UV/VIS, Cole-Parmer Instrument Co., Neots, UK) használatával végeztem el 440 nm-es hullámhosszon. A mérést követően a mintákat visszaöntöttem a kísérleti titráló lombikba. A műszer által meghatározott optikai sűrűség értékekből a biomassza koncentrációt a [2] egyenlet képlete szerint számoltam ki.

Az oldott szervesetlen széntartalom meghatározása saját fejlesztésű módszerrel

A teljes oldott szervesetlen széntartalom (*dissolved inorganic carbon, DIC*) meghatározását általában a vízminta savanyításával végzik el, amely során a HCO₃⁻ és CO₃²⁻ CO₂-molekulává alakul át, majd extrakciót és titrálást követően meghatározható a minta DIC-tartalma. Vizsgálataim során az *OxiTop* készüléket alkalmaztam a DIC nyomásmérésen alapuló meghatározására, amely módszer alkalmazására nem találtam korábbi példát a szakirodalomban. Az *OxiTop* készülék (OxiTop-IDS B6M-2.5 WTW, Weilheim, Németország) egy zárt, statikus, nyomásmérésen alapuló respirométer, amelyet eredetileg mikroorganizmusok biológiai aktivitásának értékelésére fejlesztettek ki szilárd és folyékony mintákban.

A mérések során a CO₂-dal dúsított algaszuszpenziókat zártam az *OxiTop* készülék edényzetébe, amelybe a mintán kívül egy 50 mL-es, 1 M HCl-t tartalmazó főzőpoharat is helyeztem. Az alapnyomás mérését 10 percig végeztem, majd az edényzeteket megráztam, úgy, hogy a bennük elhelyezett főzőpoharak felboruljanak, amelyet követően a sav összekeveredik a szuszpenzióval, majd a mintában oldott CO₂ felszabadul. A végnyomás 20 perc múlva stabilizálódott, amelyet követően rögzítettem a mért értékeket. A modellkísérlet előtt a CO₂-dúsított oldatokat, amelyek algasejteket és hamu kivonatot tartalmaztak, két részre osztottam. A minta egyik felét már az algaövekedési kísérlet előtt behelyeztem az *OxiTop* készülékekbe a DIC-tartalom meghatározásának céljából 3-3 ismétlésben. Az algaszuszpenzió másik felét először az algatermesztési modellkísérlethez használtam fel, majd a 4-napos kísérlet végeztével azokat a mintákat is behelyeztem az *OxiTop* készülékekbe, így lehetővé vált az oldatok kezdeti és végső DIC-értékeinek meghatározása. A méréseket állandó hőmérsékleten (20 °C) tartott készülékekben végeztem el, így a mért nyomásértékek alapján lehetőség nyílt a CO₂ mólmennyiségének meghatározására az egyesített gáztörvény felhasználásával.

A vizsgált mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeinek statisztikai kiértékelése

A *C. vulgaris* mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérletem során a különböző kezelések hatásait három ismétlésben vizsgáltam, majd a statisztikai elemzéseket az *R* Statisztikai Program 4.2.1-es verziójával végeztem el (R Development Core Team, Bécs, Ausztria). A statisztikai elemzés előtt az adatok normalitását és a variancia homogenitását Shapiro–Wilk, illetve Levene- vagy Bartlett-teszttel ellenőriztem 5%-os szignifikanciaszinten. A modellkísérlet során a kezelések hatásait egytényezős varianciaanalízissel (*one way-ANOVA*) értékeltem. A csoportok közötti összehasonlítások során *post-hoc* tesztként Tukey-tesztet alkalmaztam. Amennyiben az ANOVA alkalmazhatósági feltételei nem teljesültek, az adatokat Kruskal–Wallis-teszttel értékeltem ki, majd Dunn-tesztet alkalmaztam a csoportok közötti különbségek összehasonlítása során 5%-os szignifikanciaszinten. Ha egy vizsgált paraméter (pl. DIC-érték) esetében rendelkezésre álltak kezdeti és végső értékek is, az értékek közötti különbségeket kétmintás t-próbával értékeltem.

Eredmények és azok megbeszélése

A különböző biomassza meghatározási módszerek összehasonlításának eredményei

A különböző algakoncentráció meghatározására alkalmas módszerek átlagos eredményeit a 2. táblázat foglalja össze. A bepárlással mért algabiomassza esetében a 200x-os hígítási értéktől az eredményeket kizártam a korrelációs elemzésekből, míg a szűréssel meghatározott biomassza-értékeknél csak az 1000x-es hígítás eredményeit hagytam figyelmen kívül, mivel azok a kimutatási határ (LOD) alá kerültek. A Mg-tartalom mérésénél valószínűsíthető, hogy a 20x-os hígítás alatti értékeknél az izzítás után olyan kevés anyag maradt vissza, hogy ezek az eredmények mind az LOD-érték alatt maradtak. Ebben az esetben azonban nem zártam ki ezeket az eredményeket, mert nem befolyásolták jelentősen a megfigyelt trendet.

2. táblázat: Az algasűrűséget jellemző mért paraméterek átlagai a kiválasztott biomassza-bebecslési módszerek alapján

Hígítás (x)	Hígítási arány	Bepárlás (mg sz.a./L)	Szűrés (mg sz.a./L)	Klo-a (µg/L)	Mg (µg/L)	Sejtszám (10 ⁶ db sejt/L)	DFS (RFU)
1	1	960,0	770,0	7515,6	204,5	108222,7	1689562
2	0,5	436,7	420,0	4163,1	109,6	61578,1	1200521
5	0,2	150,0	177,5	1567,0	27,6	34113,3	853994
10	0,1	66,7	79,3	892,4	10,6	13136,7	610195
20	0,05	35,8	31,4	382,1	28,4	10664,1	369087
50	0,02	14,2	15,0	182,3	13,8	3757,8	189411
100	0,01	10,0	9,3	90,9	15,4	1699,2	112247
200	0,005	<LOD	2,5	54,6	17,5	472,7	63474
500	0,002	<LOD	1,4	20,1	11,0	371,1	32556
1000	0,001	<LOD	<LOD	12,3	6,9	105,5	26938

A különböző biomassza meghatározási módszerek közötti feltárt korrelációk

Az algakoncentrációt jellemző paraméterek meghatározása során nyert eredmények összehasonlítása során az adatsorokat (2. táblázat) egymással szemben korreláltattam, hogy feltárjam az egyes paraméterek közötti összefüggések erősségét (3. táblázat). A számok a legjobban illeszkedő trendvonalak által elért legmagasabb R^2 -értékeket jelzik, amelyeket a lineáris, és az exponenciális regresszió lefuttatása után kaptam. A kapott összefüggések egy esetet leszámítva statisztikailag erősnek ($R^2 > 0,94$) mondhatóak. Az egyetlen gyenge összefüggés a fluoreszcens mérés és a magnézium-tartalom meghatározás eredményei között állt elő ($R^2 = 0,816$). A kiemelkedően magas korrelációs értékeket ($R^2 > 0,990$) félkövérrel szedett számokkal emeltem ki. A táblázat nem tartalmazza a spektroszkópiás elemzést, mivel az ezzel a paraméterrel kapott összefüggéseket a teljes spektrumon vizsgáltam, minden egyes hullámhosszon, továbbá a kapott eredményeket külön fejezetben tárgyalom.

3. táblázat: Az egyes paraméterek esetében mért adatsorok között megállapított korrelációs együtthatók (R^2 -érték)

	Hígítás	Szűrés	Bepárlás	Mg-tartalom	Sejtszám	klo-a	DFR
Hígítás	-	0,998 (l)	0,997 (l)	0,975 (l)	0,986 (l)	0,998 (e)	0,989 (e)
Szűrés	-	-	0,989 (l)	0,966 (l)	0,993 (l)	0,999 (e)	0,987 (e)
Bepárlás	-	-	-	0,982 (l)	0,974 (l)	0,990 (e)	0,974 (e)
Mg-tartalom	-	-	-	-	0,945 (l)	0,971 (e)	0,816 (e)
Sejtszám	-	-	-	-	-	0,989 (e)	0,984 (e)
klo-a	-	-	-	-	-	-	0,986 (e)
DFR	-	-	-	-	-	-	-

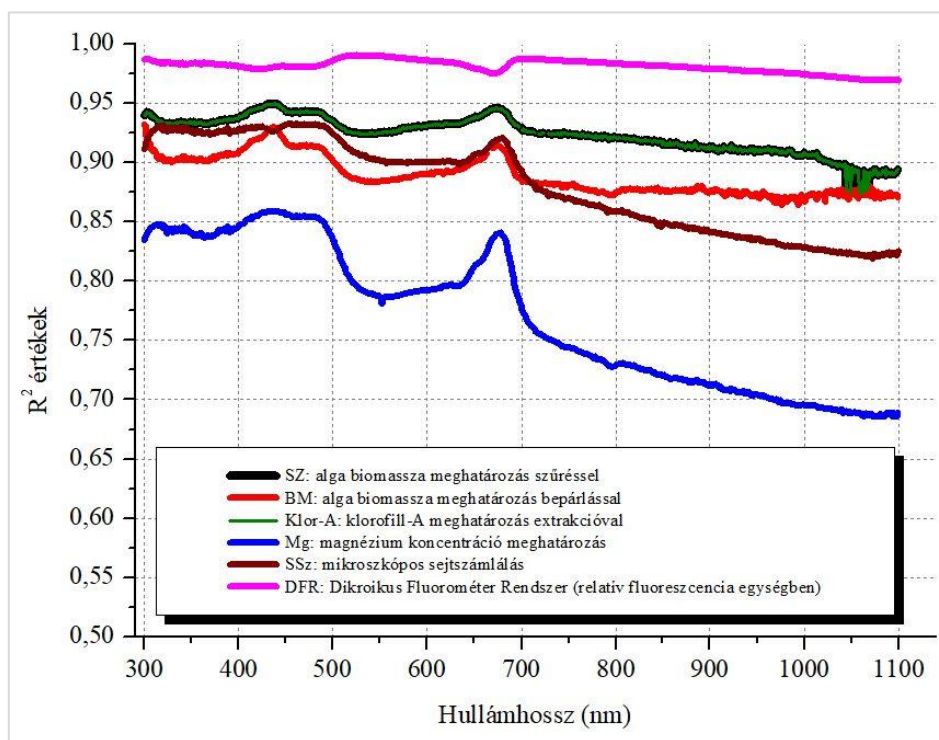
Megj.: l=lineáris regresszió, e= exponenciális regresszió, DFR= gerjesztett fluoreszcencia

A korreláció pásztázás eredményei, a determinációs együtthatók megállapítása a teljes spektrumon

Amellett, hogy a fent bemutatott korrelációk fontosak lehetnek az egyes, laboratóriumban mérhető paraméterek átjárhatóságának szempontjából, a kutatásom egyik fő fókusza ezen paraméterek és az optikai sűrűség közötti korreláció megállapítása volt. Ahogy azt a 2.6. fejezetben bemutattam, a *C. vulgaris* spektrofotometriás mérésének területén nem mutatkozik egyetértés a szakirodalomban sem a méréshez használt hullámhossz, sem a biomaszatömegre történő átváltáshoz felhasznált egyenlet tekintetében. A kutatásaim során ezért nagyon fontos volt, hogy ezt az összefüggést ne egy-egy szerzőt követve, majd egy adott hullámhosszat kiválasztva végezzem el a méréseket, hanem első lépésben matematikai módszerekkel bizonyítsam, hogy melyik az a hullámhossz, ahol a *C. vulgaris* sejtsűrűségét a legpontosabban lehet mérni.

Az általam készített hígítási sorozat bemutatott spektrumadatai minden hullámhosszon 10 adatpontból álló sorozatot alkotnak. Az így kapott adatsorokat egyenként össze lehet hasonlítani a hígítási sorozatból származó ugyanazon 10 minta laboratóriumi algakoncentrációs mérési eredményeivel. Ahhoz, hogy meghatározzuk a vizsgált paraméterek között elérhető legerősebb korrelációt a teljes UV–VIS spektrumon, minden egyes pontnál illesztenünk kell egy függvényt, valamint trendvonalat a két paraméterre vonatkozóan, ami azt jelentené, hogy paraméterenként összesen 800 függvényt kellene felvenni és ábrázolni. A feladat automatizálásának érdekében Delphi-alapú programot használtam, amely folyamatosan pásztázta a lineáris regressziós kapcsolatok erősségét jellemző R^2 -értékek alakulását (1. ábra). A teljes mért spektrumon végrehajtott korrelációs pásztázás eredményei alapján az erősebb korrelációt jelentő és magasabb, lokális maximumértékhez tartozó R^2 -értékek ott jelentek meg, ahol az eredeti spektrumok csúcserkékei is voltak. Egyetlen kivétel a fluoreszcencia értékeknél volt megfigyelhető, ahol nagyjából ennek az ellenkezője figyelhető meg. Az eredetileg fekete színnel jelölt, szűréssel meghatározott biomasz értékek teljes takarásban vannak jelen a grafikonon, ugyanis ez az adatsor rendkívül erős korrelációt mutatott a zöld színnel jelölt klorofill-a koncentrációs adatokkal. Az optikai sűrűség és a további algabiomasszáat becslő paraméterek között meghatározott maximális korrelációs értékeket a látható hullámhossz-tartományban (400–800 nm) a 4. táblázat foglalja össze. Ahogy az várható volt, ott érdemes mérni, ahol az algák hatékonyabban nyelik el a fényt, így a *C. vulgaris* fotoszintetikus pigmentjeinek jellemző csúcsain magasabb korrelációs együtthatók figyelhetők majd meg. Meglepő volt azonban, hogy a 680 nm körüli csúcs egyik paraméter esetében sem eredményezett maximális

determinációs együtthatót annak ellenére, hogy ez a szakirodalomban egy igen népszerű, sokak által javasolt mérési hullámhossz, ugyanis itt egy egyértelmű, könnyen észlelhető lokális maximuma van a spektrumnak. A biomaszmérési módszerek eredményei alapján a 439 és a 437 nm-es hullámhosszak mutatták a legmagasabb korrelációt, ezért – tekintettel arra a tényre, hogy sok spektrofotométer nem képes 5 nm-nél kisebb léptékek kezelésére – a 440 nm-es hullámhosszt választottam ki a korreláció finomhangolásához, illetve a biomaszbecslés összefüggésének megállapítására.



1. ábra: A korrelációs együtthatók (R^2) erőssége az optikai sűrűség mérése és a további algabiomasszá becslő paraméterek között a teljes spektrumon

4. táblázat: A teljes spektrumok alapján az egyes algabiomasszá becslő paraméterek esetében meghatározott legerősebb korrelációs értékekhez (legmagasabb R^2) tartozó hullámhosszak

Hígítás	Szűrés	Bepárlás	Mg-tartalom	Sejtszám	klo-a	DFR
R^2 max	0,94961	0,92922	0,85855	0,93257	0,94961	0,99000
R^2 max hullámhossza	439	437	442	461	439	525

Megj.: DFR= gerjesztett fluoreszcencia

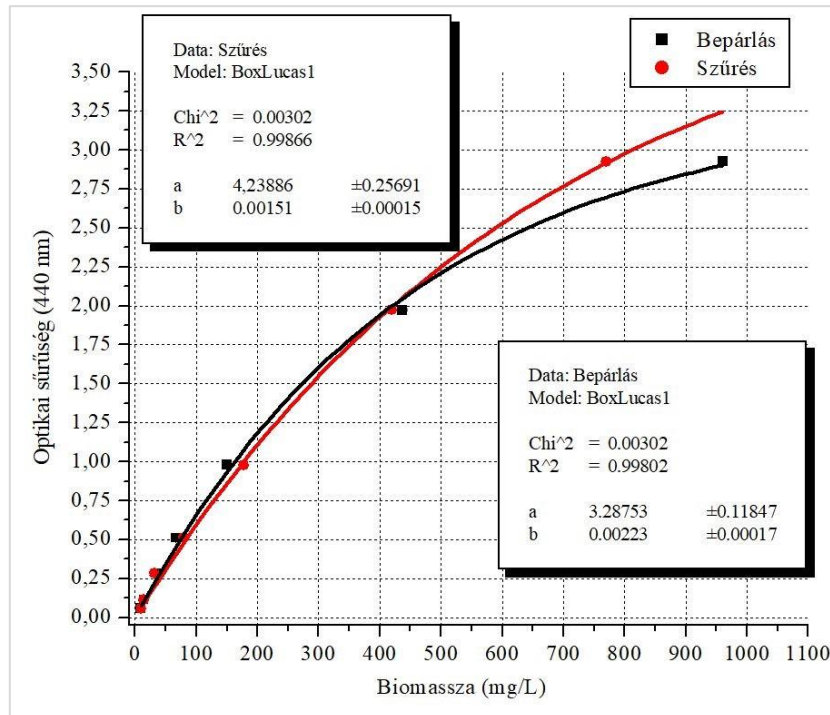
Az algabiomassza becslésére ajánlott képlet

A megfelelő hullámhossz kiválasztása után a korrelációt tovább pontosítottam az *Origin* szoftver különböző beépített függvényeinek tesztelésével (2. ábra). A hígítási sorozat mentén mért biomasz-koncentrációt az optikai sűrűség értékeivel korreláltatva a legnagyobb pontossággal egy exponenciális (telítési) görbére illeszkedtek, ugyanis egy bizonyos számú algasejt felett statisztikailag nagy az esély arra, hogy a sejtek egymást részben fedjék, így egy további algasejt megjelenése a koncentráltabb szuszpenzióban már nem okoz olyan mértékű fényintenzitás-növekedést, mint a hígabb minták esetében.

Az ismert telítődési jelenség alapján is kézenfekvő a telítési görbe kiválasztása, így a program beépített függvényei közül a Box–Lucas függvényt [1] alkalmaztam:

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad [1]$$

ahol a és b állandók, x és y a függvény változói



2. ábra: A 440 nm-en mért optikai sűrűség értékek és a szűrés, valamint a bepárlási maradék módszerrel meghatározott algabiomassza száraz tömegre vonatkoztatott adatsorok közötti korrelációk

A 440 nm-es hullámhosszt kiválasztva, a bepárlási maradék módszerrel mért száraz algabiomassza tömegkoncentráció (c) és a az optikai sűrűséggel (OD) mért jelkülönbség között a exponenciális összefüggést [2] állapítottam meg:

$$C_{\text{algabiomassza}} \text{ mg / L (sz.a.)} = \ln(1 - OD_{440 \text{ nm}} / 3,29) / (-0,0022) \quad [2]$$

A *C. vulgaris* mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményei

A modellkísérlet során kapott eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A WBA-kezelések eredményeinek statisztikai elemzése szerint a kontrollhoz képest magasabb végső algakoncentrációkat, biomassza-változást és fajlagos növekedési rátákat figyeltem meg ($p \leq 0,038$). A legmagasabb végső algakoncentrációt, biomassza-változást és fajlagos növekedési rátákat a 10%-os és 25%-os WBA-kezelések esetében határoztam meg a kontroll csoporthoz képest ($p < 0,001$) (3. ábra). Minden kezelés esetében szignifikáns különbségeket mutattam ki a kezdeti és végső algakoncentrációk között ($p \leq 0,006$). A kontrollhoz képest szignifikánsan magasabb pH-értékeket tapasztaltam a 10%-os, 25%-os és 50%-os WBA-kezelések esetében ($p < 0,001$), míg minden csoportban szignifikánsan eltérő pH-változást figyeltem meg ($p < 0,050$).

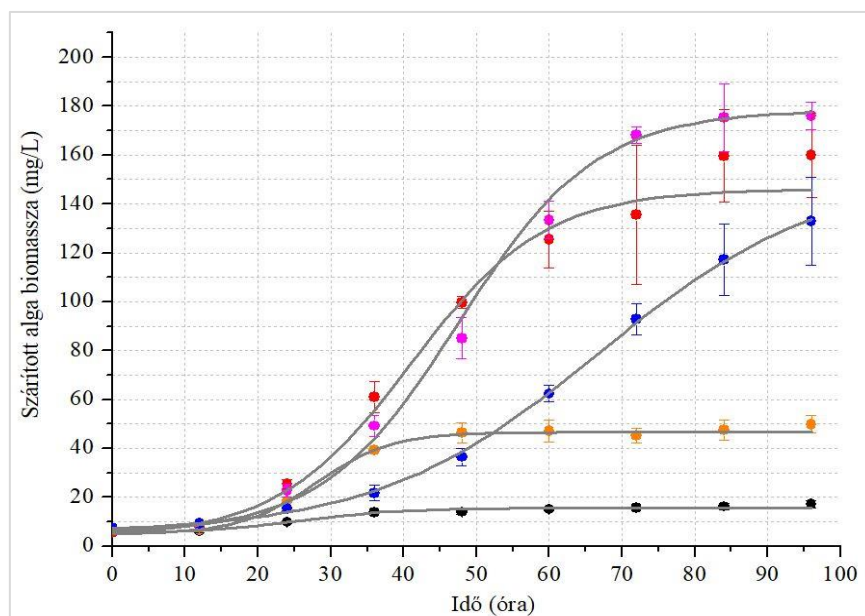
5. táblázat: A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet összesített eredményei

Mért paraméter	Mértékegység	kontroll	0% WBA	10% WBA	25% WBA	50% WBA
kezdeti alga BM	mg/L (sz.a.)	5,6 ± 0,5 a	5,5 ± 0,6 a	5,5 ± 0,8 a	6,5 ± 0,7 a	5,7 ± 0,8 a
végső alga BM	mg/L (sz.a.)	*17,1 ± 0,5 a	* 49,8 ± 3,6 b	* 160,2 ± 17,2 c	* 176,0 ± 5,6 cd	* 133,3 ± 18,0 d
biomassza változás	mg/L (sz.a.)	11,5 ± 1,6 a	44,3 ± 3,8 b	154,7 ± 17,1 c	169,5 ± 5,5 cd	125,8 ± 18,3 d
tömeg sokszorozódás	-	3,10 ± 0,4 a	9,24 ± 1,3 a	29,32 ± 3,5 b	27,21 ± 1,8 b	17,83 ± 3,2 c
μ	1/4nap	0,28 ± 0,03 a	0,55 ± 0,04 b	0,84 ± 0,03 c	0,83 ± 0,02 c	0,72 ± 0,04 d
td	nap	1,97 ± 0,11 a	1,29 ± 0,07 b	0,86 ± 0,04 c	0,89 ± 0,02 c	1,02 ± 0,06 c
pH (CO ₂ nélkül)	-	6,94 ± 0,01 a	6,79 ± 0,01 a	9,67 ± 0,20 b	11,18 ± 0,06 c	12,15 ± 0,04 d
pH változás	-	0,05 ± 0,01 a	0,87 ± 0,04 b	3,95 ± 0,17 c	2,98 ± 0,09 d	1,83 ± 0,06 e
kezdeti DIC 7	mg C /L	LOD	10,4 ± 0,00 a	48,6 ± 7,96 b	156,3 ± 9,03 c	309,2 ± 7,96 d
végső DIC	mg C /L	LOD	3,5 ± 3,01 a	* 3,5 ± 3,01 a	* 90,3 ± 3,01 b	* 218,9 ± 10,42 c
DIC felvétel hatásfoka	%	-	66,7 ± 28,9 ab	92,8 ± 6,5 a	42,2 ± 1,4 b	29,1 ± 5,15 b

Megj.: BM biomassza, Duplázódási idő (td) fajlagos növekedés (μ) WBA: hamu (wood biomass ash) kivonat; DIC: oldott szervetlen szén (dissolved inorganic carbon); <LoD: a kimutatási határ (Level of Detection) alatti eredmény; a-b-c-d betűjelek: statisztikailag szignifikáns különbséget jelez a kontroll és a kezelt csoport között ($p \leq 0,05$); * szignifikáns különbséget jelez a kezdeti és a végső érték között ($p \leq 0,05$)

Az egyes kezelt csoportok kezdeti oldott *DIC*-tartalma szignifikánsan különbözött, míg a legmagasabb végső *DIC*-értékeket az 50%-os WBA-kezelés esetében mértem ($p < 0,001$). Szignifikáns különbségeket figyeltem meg a kezdeti és végső *DIC*-értékek között a 10%-os, 25%-os és 50%-os WBA-kezelések esetében ($p \leq 0,003$) (4. ábra). A 0%-os WBA-kezelés esetében azonban nem volt kimutatható szignifikáns különbség a kezdeti és végső *DIC*-értékek között ($p = 0,057$). A legnagyobb *DIC*-tartalom csökkenés a 10%-os WBA-kezelés esetében volt megfigyelhető ($p \leq 0,014$), bár a különbség nem volt szignifikáns a 0%-os WBA-kezeléshez képest ($p = 0,223$). Az alga növekedéssel kapcsolatos paraméterek alapján a 10%-os és 25%-os WBA-kezelések bizonyultak a legmegfelelőbbnek, míg a legnagyobb *DIC*-tartalom csökkenést a 0%-os és 10%-os WBA-kezelések esetében észleltem.

Összegezve tehát a vizsgált paraméterek eredményeit, a 10%-os WBA-kezelés tekinthető a optimálisnak az algák növekedése, szénfelvétele és a hamu kivonat, mint lúgos CO_2 elnyelő közeg regenerációs képessége szempontjából.



3. ábra: Az algabiomassza növekedése a különböző WBA-kezelések esetében (fekete: kontroll kezelés WBA és CO_2 diffúzió nélkül; narancs: 0%-os WBA kezelés CO_2 - diffúzióval; piros: 10%-os WBA kezelés CO_2 -diffúzióval; lila: 25%-os WBA kezelés CO_2 - diffúzióval; kék: 50%-os WBA kezelés CO_2 diffúzióval)

Következtetések és a javaslatok

A különböző biomassza meghatározási módszerek eredményeiből levont következtetések

A *Chlorella vulgaris* algasejt magnézium- és klorofill-a-tartalma

A *C. vulgaris* alga átlagos ásványi Mg-tartalma a mért biomassza tömege és ugyanazon hígítási tag Mg-tartalma alapján meghatározható. Az algafaj átlagos egysejttömege a biomassza tömegéből és a sejtszám értékekből számítható ki. A tervezett számításokhoz meghatároztam az egyes hígítási mintákból származó adatok átlagértékeit. A magasabb hígítási szinteken végzett laboratóriumi mérések feltételezett pontatlanságai miatt a 20-szoros hígítást meghaladó minták nem képezték a számítás alapját (6. táblázat).

6. táblázat: A mért algakoncentrációkból származtatott specifikus értékek

Hígítás	BM (mg/L sz.a.)	Mg (µg/L)	Mg (mg/100 g sz.a.)	klo-a (Mg alapján, µg/L)	klo-a (µg/L)	sejtszám (10 ⁶ db sejt/L)	átlag sejt (µg/10 ⁶ db sejt)
1x	960	205	21,31	7521	7516	108223	8,871
2x	437	110	25,09	4029	4163	61578	7,091
5x	150	28	18,40	1015	1567	34113	4,397
10x	67	11	15,83	388	892	13137	5,075
átlag ± SD			20,16 ± 3,98				6,36 ± 2,03

A végrehajtott számítási módszer alapján 1 millió darab *C. vulgaris* algasejt száraz tömege $6,36 \pm 2,03 \mu\text{g}$, vagyis $6,36 \pm 2,03 \times 10^{-12} \text{ g/sejt}$. A szakirodalomban erre vonatkozóan meglepően nehéz olyan releváns adatokat találni, amelyekkel össze lehet hasonlítani ezt az eredményt. Az egyetlen elérhető adat alapján 1 millió sejt becsült tömege $22,4 \mu\text{g}$ ($2,24 \pm 0,16 \times 10^{-11} \text{ g/sejt}$), amely egy szakdolgozat, így nem tekinthető hivatalosan tudományos publikációnak. Ez az eredmény egyébként nagyságrendileg megközelíti az általam mért értéket. A *C. vulgaris* magnéziumtartalmát tekintve a számításom alapján $20,156 \pm 3,98 \text{ mg/100 g}$ (sz.a. tartalomra vonatkoztatva). Az eredmény szakirodalmi adatokkal történő összevetése során, érdekes tudományos helyzet alakul ki, ugyanis a szerzők által meghatározott értékek nagyságrendileg két csoportba sorolhatók (6. táblázat).

A tanulmány eredményeinek lehetséges alkalmazási területei

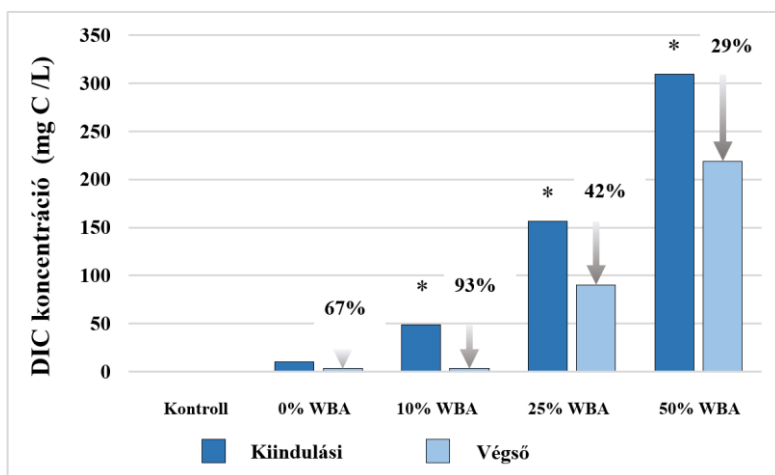
A korrelációs pásztázás során meghatározott hullámhosszak és a telítési (exponenciális) görbével végzett további korrelációs elemzések révén lehetőség nyílik gyors biomassa meghatározásra alkalmas eljárások végrehajtására az ipari algatermelés területein, anélkül, hogy a mintázott biomasszát károsítanánk. Azonban továbbra is kérdéses lehet, a gerjesztett klorofill-a-fluoreszcencia detektálást vagy az UV–VIS spektrofotometriás optikai sűrűségmérést érdemes-e alkalmazni. Az ISO 7027-1:2016 vízvizsgálati szabvány a szennyező részecskék számának megfelelően két mérőműszer használatát ajánlja, így a kevésbé szennyezett minták esetén (víztisztítás) nefelometriás mérés alkalmazható. Az erősen szennyezett, zavaros minták (szennyvíztisztítás) esetén turbidimetriás módszerek alkalmazása ajánlott.

Az ajánlásokat követve a 10 hígított mintánkat 5 hígabb és 5 sűrűbb mintacsoportra osztottam, majd a szétválasztott adatsorainkra vonatkoztatva összehasonlítottam a kapott korrelációk erősségét. A hígabb minták esetében a fluoreszcencia detektálással mért adatsor magasabb determinációs együtthatót eredményezett, ami a mérőműszer működési elvével magyarázható. A készülékben a fényforrás–minta–detektor együttes elhelyezkedése 90 fokos szöget zár be, így a készülék az adott szögben a részecskék által szórt fényt méri, ami különösen hatékony, ha a mintában csak kevés algasejt van jelen. Nem meglepő módon a kevésbé hígított, koncentráltabb minták esetében az UV–VIS spektroszkópia módszer pontosabb eredményeket adott ($R^2 = 0,99993$) a fluoreszcens detektálás eredményeihez képest ($R^2 = 0,98533$). Az alkalmazott készülékben a fényforrás–minta–detektor együttes elhelyezkedése 180 fokos szöget zár be, azaz mindhárom objektum egy vonalban helyezkedik el, így a részecskék által elnyelt fényt méri. Ez az elrendezés így nagyobb pontosságot tesz lehetővé, amennyiben a részecskék koncentráltabban vannak jelen a szuszpenzióban.

Abból, hogy a kiválasztott mérési hullámhossz matematikailag is bizonyítást nyert, egyenesen következik az is, hogy a továbbiakban a 440 nm-es hullámhosszra kell fókuszálni a mérőeszközök fejlesztésénél.

A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeiből levonható következtetések

Az alkalmazott OxiTop készülékkel elvégzett mérés alkalmas a DIC-tartalom meghatározására (4. ábra).



4. ábra: Az oldott szervetlen széntartalom eltávolítási hatásfoka (a kezdeti és a végso DIC-értékek közötti szignifikáns különbséget csillaggal jelöltem, 5%-os szignifikancia szinten)

A fabiomassza égetésekor melléktermékként keletkező hamu vizes kivonata képes elnyelni a CO₂ gázt és ezt a széntartalmat a *C. vulgaris* mikroalga képes felvenni a növekedése közben. A szénfelvétele során az alga képes volt a CO₂ elnyelő közeget regenerálni.

A modellkísérletben a termesztőközeg kezdetben lúgos volt a WBA (fabiomassza hamu) kivonat hozzáadása miatt. A WBA-kivonat arányának növelésével, a közeg egyre lúgosabbá vált, ami egyúttal több CO₂ megkötését tette lehetővé. A kísérlet kezdetekor a CO₂ diffúziós kezeléssel az összes kezelést egységes pH-értékre állítottam be (pH = 6). Az algabiomassza növekedése során a közeg lúgosodása számos tanulmányban dokumentált jelenség, ami jól megfigyelhető volt a modellkísérletem során is. A legmagasabb végso pH-értéket a 10%-os WBA-kezelés során mértem, elérve a CO₂-kezelés előtti szintet, ami arra utal, hogy ezekben a mintákban az algák növekedése teljes mértékben regenerálta a mosóközeg pH-ját

Kimutattam, hogy a CO₂-diffúzió és a hamu kivonat kezelés nem mutatott toxikus hatást a *Chlorella vulgaris* mikroalga növekedésére.

Az eredményeim alapján a WBA-kivonat hatékonyan kötötte meg a CO₂-t anélkül, hogy toxikus hatást gyakorolt volna az algák növekedésére. Ugyanakkor a magasabb koncentrációk esetében gátolta a növekedést, ami meghosszabbodott

lag-fázist eredményezett. Az algasejtek képesek a WBA-kivonatból származó CO₂-t szénforrásként hasznosítani, ami CO₂-fogyáshoz, a biomassa növekedéséhez és a pH megemelkedéséhez vezetett. A szakirodalom szerint a *Chlorella* fajok általában a 6–6,5 pH-tartományban fejlődnek optimálisan, míg a *C. vulgaris* hatékonyan növekedhet lúgos körülmények között is (pH=10,5). A *C. vulgaris* rendkívül alacsony pH mellett is szaporodni képes, amely képességük számos forrás szerint a laborléptékű tenyészetekben a zooplankton-kontroll módszerek alapját képezi.

A modellkísérlet eredményei alapján ki tudtam választani a 10%-os WBA-kezelést, amelyet a további kutatások, valamint az ipari alkalmazások során alkalmazni lehet.

A WBA-kivonat optimalizálása során a 10%-os és 25%-os WBA-kezelések bizonyultak a legmegfelelőbbnek az algák növekedése szempontjából, amelyek $154,7 \pm 17,1$, illetve $169,5 \pm 5,5$ mg biomassa többletet produkáltak a 4 nap alatt. Ha a kiindulási biomassa mennyiségre fajlagosan adjuk meg a növekményt, akkor a fajlagos növekedés $0,84 \pm 0,03$ és $0,83 \pm 0,02$ 1/nap volt, míg a duplázódás ideje $0,86 \pm 0,04$ és $0,89 \pm 0,02$ nap, a tömeg sokszorozódása pedig $29,32 \pm 3,5$, illetve $27,21 \pm 1,8$ -szeres volt a két kezelés esetében a 4 napos növekedésre számolva (5. táblázat). Habár az utóbbi értékek statisztikailag nem különíthetők el egymástól szignifikáns mértékben. Ha a CO₂-eltávolítás hatékonyságát is figyelembe vesszük, akkor a 10%-os WBA-kezelés esetében tapasztaltam a legmagasabb hatásfokot ($92,8 \pm 6,5$ %). A 25%-os WBA-kezelést jóval alacsonyabb hatásfok jellemezte ($42,2 \pm 1,4$ %), így a pH-értéket sem sikerült az eredeti, CO₂-diffúzió előtti értékre emelnie az algasejteknek. A 10%-os WBA-kezelés esetében a termesztésre felhasznált mosóoldat teljes mértékben regenerálva lett, így a pH a kezelés végén 9,95-ös értéket ért el.

A szakirodalomban található alga hozam értékek kritikai áttekintése

Ebben a részben kísérletet teszek egy rövid kritikai áttekintés keretében a szakirodalomban található alga kihozatali adatok realitását kielemezni. A továbbiakban a mérési eredményeimmel alátámasztva több megközelítést alkalmazva bizonyítom, hogy a szakirodalomban található adatokban gyakran túl optimista becslésekre alapozzák az algabiomassa növekedését, így az ipari szektor a gyakorlatban az irodalmi ígéretektől jóval elmaradó eredményeket produkál.

1. érv: A hígítási sorom kiindulási eleme

A biomassa becsléshez felhasznált hígítási sor első eleme egy igen tömény, literenként $1,095 \times 10^{11}$ sejtet tartalmazó szuszpenzió volt. Ez egy igen sötét zöld,

már szinte fekete színt mutatott. Ennek biomasza koncentrációját két módon is meghatároztam, de egyik esetben sem érte el az 1 g/L-es értéket (szűrés: 0,77 g/L, bepárlás: 0,96 g/L). A minta esetében a spektrofotométer is a kimutatási határa ($OD > 2,990$) körüli értékeket mért az egyes csúcsokon annak ellenére, hogy ott a fénynek egy igen szűk keresztmetszetű ($d=5$ mm) küvettán kell csak áthatolnia. Ezeket ismerve, a szakirodalomban található olykor 30 g/L fölötti értékeket nem tartom valószínűk.

2. érv: A pixel borítottság

A legtöményebb minta fent leírt algasűrűségére az *ImageJ* programban elkövetett képfeldolgozása átlagosan 13%-os pixel borítást eredményezett. Ez alapján meghatároztam egy elméleti maximum értéket, amikor 100%-ban alga borítja a felületet, amely **7,38 g/L** értéket eredményezett. Fontos megjegyezni, hogy a valóságban ettől valamivel nagyobb lehet a maximum érték mivel a Bürker-kamának van mélysége is, nem egy adott sík vetületét olvassuk le vele.

3. érv: A sejtek által kitöltött térfogat

Ismerve azt, hogy a *C. vulgaris* geometriája szabályos gömb, amelynek a szakirodalomból ismert a 2–10 μm -es átmérője, így meghatározható az algasejt térfogata. Ha ezt felszorozzuk a tömény minta literenkénti sejtszámával, akkor 0,45cm³ és 56,67cm³ értékeket kapunk. Ez 1 literre nézve 0,05 és 5,67 %V/V. Ebből ismét számítottam egy elméleti maximumot, ahol a térfogat 100%-át az alga teszi ki. Ez alapján a két sejtátmérővel kalkulálva 1920, illetve **16,9 g/L**. Ez alapján kijelenthető, hogy 10 μm -es sejtekkel számolva 17 g/L biomasza koncentráció fölött a sejtek már összeérnének. Ezt természetesen lehetetlen elérni, már ha csak a növekedéshez szükséges fényigényt nézzük, ami ilyen sűrűség esetében igen kis hatékonysággal jut el az egyes sejtekig.

4. érv: Az ipari statisztikák

A *Chlorella*-fajokra vonatkozó növekedési értékek szórása rendkívül magas. Ez részben magyarázható az előző fejezetben taglalt fajlagos értékekben való kifejezéssel, ahol számos hiba lehetőség van már a vizsgált felület/térfogat/időintervallum kiválasztásában. Még egyetlen cikk esetében is nagyon nagy az értékek közötti szórás, amit jól érzékelteti Je és Yamaoka (2022) munkája, amelyben 3 és 5370 mg/L/nap között találunk értékeket. Ezeket az adatokat összevetve az EU 182 t éves mikroalga termesztési volumenével a két kapacitási értékkel számolva ezt 170 000 m³, illetve 93 m³ térfogatú termesztőközegben tudnánk előállítani. Utóbbi 3 db standard szállító konténert jelentene, ami igen valószínűtlen, különben jóval elterjedtebb lenne globálisan a mikroalga technológia.

Javaslatok

Eredményeim alapján a monokultúrás és axénikus *C. vulgaris* termesztés során a növekedést a 440 nm-es hullámhosszon kell vizsgálni, amelyre LED világítás és fotodióda párt, vagy lézer fényforrást és lézer dióda párt kell alkalmazni ezen a hullámhosszon. A mérés során fennálló zajoknak, a nem az algából származó fényelnyeléseknek a kiküszöbölésére alkalmazható egy hasonló páros eszköz a 750-es hullámhossz, amely az ISO és a Felföldy-módszer szerint is alkalmazandó erre a célra. Az alga kék fény elnyelését érdemes volna tovább vizsgálni olyan termesztési kísérletekben, amelyben a fényforrás egyszerre produkálja a 680 nm és a 440 nm körüli csúcsokat, például fehér színű LED fényt felhasználva. Az algasejtek biomassza becslésére javasolt modellt érdemes volna további mérésekkel validálni ismeretlen mintákon, majd összehasonlítani az eredményeket más típusú spektrofotométeren elvégzett vizsgálatokkal. A pásztázást és az összefüggést ezután más mikroalgafajok esetében is érdemes volna vizsgálni.

Szintén további összemérésekre, validációra van szükség a digitális sejtszámlálási módszer és az *OxiTop* berendezéssel elvégzett oldott szervesetlen szén meghatározása esetében. A biomassza hamu kivonatot a mintázott erőmű különböző évszakaiban is meg kell vizsgálni, majd összevetni a szezonálisból fakadó minőségbeli eltéréseket, továbbá összehasonlítani más növények tüzeléséből származó hamu kivonatokkal/oldatokkal. A hamu kivonatot érdemes lenne megvizsgálni az algakezelések után is, hogy az alga által esetlegesen felvett elemek (pl. kálium) mennyire befolyásolják a mosóoldat jövőbeli felhasználhatóságát. A modell CO₂ gáz helyett a jövőben érdemes lenne az iparból származó füst és biogázokat elnyelelni a mosóoldatban, majd vizsgálni az alga növekedését, így kiszűrve az esetleges növekedést gátló hatásokat, illetve a potenciálisan alkalmazható és az algasejtek által hasznosítható nyomgázokat. A gyakorlatban ezáltal potenciálisan tudnánk csökkenteni a gázeltávolítás költségeit. Igen hasznos lenne az előállított algabiomassza beltartalmi értékeit is vizsgálni, ami alapján láthatóvá válna, hogy a kezelés mennyiben változtatja meg a biomassza összetételét a kontrollhoz képest, továbbá, hogy a kapott biomassza mely iparágakban lehet felhasználható az adott minőségi paraméterek mellett.

Új tudományos eredmények

1. Egy új eljárás, az ún. korreláció pásztázás segítségével matematikailag bizonyítottam, hogy az exponenciális növekedési fázisban lévő *Chlorella vulgaris* mikroalga legmegbízhatóbb mérési hullámhossza UV-VIS spektrofotometriás módszerrel a 440 ± 3 nm-es csúcson található. Ezzel a szakirodalomban sokat vitatott kérdést sikerült matematikailag is igazolnom. A megfelelő hullámhosszt kiválasztva, a jelenséget pontosabban leíró, exponenciális függvényt kiválasztva az alábbi összefüggést állapítottam meg az optikai sűrűséggel (OD) mért jelkülönbség és a szuszpenzió száraz algabiomassza tömegkoncentrációja (c) között:
$$C_{\text{algabiomassza}} \text{ (mg/L sz.a.)} = \ln(1 - OD_{440 \text{ nm}} / 3,29) / (-0,0022)$$
2. A vizsgálati eredményeim alapján $6,36 \pm 2,03 \times 10^{-12}$ g-ban meghatároztam a *Chlorella vulgaris* mikroalga átlagos száraz egysejttömegét és $20,156 \pm 3,98$ mg/100 g-ban a száraz biomassa átlagos magnéziumtartalmát. Utóbbival igazoltam, hogy a szakirodalomban található 300 mg/100 g fölötti értékek nem érhetőek el a dolgozatban bemutatott termesztési körülmények között.
3. Bizonyítottam, hogy az *OxiTop* (IDS B6M-2.5 WTW) készülék alkalmas az oldott, illetve savban oldható karbonát és hidrokarbonát formában levő szervesetlen széntartalom (DIC) mérésére. Az eljárás alapját a készülék nyomás mérési képessége adja, amely a folyamat során a gáztérben megjelenő CO₂ gáz által okozott többlet nyomást detektálja. A mérés során az edényzetbe a szuszpenzió mellé sav-oldatot helyeztem főzőpohárba. Az edény lezárása után az alap nyomásszint megállapítása után a főzőpohár felborítása révén a sav-oldat a szuszpenzióba keveredik és kihajtja annak CO₂-tartalmát. Az így mért nyomásváltozás az egyesített gáztörvény alapján egyenesen arányos a mérendő DIC koncentrációval. Mivel a műszer által mérhető legkisebb nyomásváltozás 1 hPa, így 200 mL térfogatú minta esetén a legkisebb detektálható DIC érték: 5,21 mg C /L.
4. Kimutattam, hogy a fabiomassza égetésekor melléktermékként keletkező hamu vizes kivonata képes elnyelni a CO₂ gázt. Ezt a kiinduláskor mért DIC koncentráció értékek bizonyítják, ahol a kezelt mintákon a kezeletlen kontroll mintákhoz képest többlet értékeket figyeltem meg. Ezt a széntartalmat a *Chlorella vulgaris* mikroalga képes felvenni és hasznosítani a növekedése során, amelyet a DIC csökkenésből és a kezelt minták kontroll kezeléshez viszonyított jelentős többlet biomassa növekedése bizonyított. A szénfelvétele során az alga képes volt a CO₂ elnyelő közeget regenerálni, amelyet a mért pH értéke mutat a 10%-os hamu kivonat kezelés esetében. Itt

a hamu kivonat kémhatása eredetileg $9,67 \pm 0,20$ volt, majd $5,99 \pm 0,02$ értékre csökkent a CO₂ diffúzió hatására. Végül a megfigyelt algabiomassza növekedés következtében 4 nap után $9,95 \pm 0,18$ -as pH értékkel elérte a kiindulási lúgosságát.

5. Kimutattam, hogy a 10, 20 és 50%-ban adagolt, CO₂-diffúzióval egybekötött hamu kivonat kezelések nem gyakoroltak toxikus hatást a *Chlorella vulgaris* mikroalga növekedésére. Ezt a kezelt mintákon mért, a kontroll kezeléshez viszonyított jelentős többlet biomassza növekedés bizonyítja. A szobahőmérsékleten (25 ± 1 °C) elvégzett modellkísérlet alapján, a CO₂ diffúzióval egybekötött, 10%-os hamu kivonattal történő kezelés bizonyult a leghatékonyabbnak. Ennél a kezelésnél a kiindulási ($5,5 \pm 0,8$ mg/L) és végső ($160,2 \pm 17,2$ mg/L) biomassza koncentrációja közötti a legmagasabb, $29,32 \pm 3,5$ -szeres arány volt megfigyelhető. A kezelés során az alga teljes mértékben regenerálta ($9,95 \pm 0,18$) a közeg kiindulási ($9,95 \pm 0,18$) pH értékét és $92,8 \pm 6,5$ %-al csökkentette a szuszpenzió kiindulási DIC értékét.

A szerzőnek az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációi

Külföldi kiadású szakfolyóiratban megjelent idegen nyelvű tudományos folyóiratcikkek:

- Fekete Gy.**, Klátyik Sz., Sebők A., Dálnoki A.B., Takács A., Gulyás M., Czinkota I., Székács A., Gyuricza Cs., Aleksza L. (2024): Optimization of a *Chlorella vulgaris*-based carbon sequestration technique using an alkaline medium of wood biomass ash extract. *Water* **16**: 3696.
- Fekete Gy.**, Sebők A., Klátyik Sz., Varga Zs.I., Grósz J., Czinkota I., Székács A., Aleksza L. (2024): Comparative analysis of laboratory-based and spectroscopic methods used to estimate the algal density of *Chlorella vulgaris*. *Microorganisms* **12**: 1050.

Idegen nyelvű konferenciakiadványban megjelent összefoglalók:

- Fekete Gy.**, Varga Zs., Aleksza L., Gulyás M., Czinkota I. (2020): An investigation on replacement alternatives of the nutrient requirements of microalgae with agricultural byproducts. *Abstract book of the 19th Alps-Adria Scientific Workshop* (Wisła, Lengyelország) pp. 31-31.
- Fekete Gy.**, Aleksza L., Köles P., Grósz J., Dálnoki B.A. (2018): Investigation on the growth of microalgae affected by biomass ash extract treatment. *17th Alps-Adria Scientific Workshop: Abstract book* (Hnanice, Csehország) pp. 150-151.
- Fekete Gy.**, Gulyás M., Longhurst P., Jiang Y. (2014): Impact of biogas injection on growth of algal biomass (Biogáz-áramoltatás hatása alga biomassza növekedésére). *II. Sustainable development in the Carpathian Basin" international conference – book of abstracts* (Gödöllő) pp. 79-81.

Magyar nyelvű konferenciakiadványban megjelent összefoglalók:

- Fekete Gy.**, Aleksza L., Köles P., Czinkota I., Dálnoki A.B., Grósz J. (2018): Faalapú biomassza hamu vizes kivonatában megkötött szén-dioxid felhasználása mikroalga termesztésben. *XIV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia kiadványa*. MAG Mezőgazdaságért Alapítvány (Gödöllő), pp. 87-92.
- Fekete Gy.**, Aleksza L., Köles P., Czinkota I., Grósz J., Dálnoki A.B. (2018): Oldatban elnyeletett széndioxiddal kezelt mikroalgák vizsgálata.

- Alkalmazkodó Vízgazdálkodás: lehetőségek és kockázatok.
Víz tudományi Nemzetközi Konferencia (Szarvas). pp. 43-43.
- Fekete Gy.**, Rétháti G., Kovács A., Dálnoki A.B., Grósz J., Tóth P.P. (2017):
Mikroalgák szervesanyag-tartalmának vizsgálata. 6. Környezetkémiai
Szimpózium, Program és előadáskivonatok (Bakonybél) pp. 15.

Egyéb idegen és magyar nyelvű tudományos művek:

- Fekete Gy.** (2017): Industrial use of microalgal biomass. *Biohulladék* **11**: 13-19.
- Fekete Gy.** (2017): The industrial use of microalgal biomass. *Biohulladék* **11**: 1.
- Fekete Gy.** (2016): Mikroalga tenyésztési módszerek. *Biohulladék* **10**: 35-40.

A szerzőnek az értekezés témaköréhez nem kapcsolódó, egyéb publikációi

Külföldi kiadású szakfolyóiratban megjelent idegen nyelvű tudományos folyóiratcikkek:

- Mörthl M., Damak M., Gulyás M., Varga Zs.I., **Fekete Gy.**, Kurusta T., Rácz Á., Székács A., Aleksza L. (2024): Biodegradation assessment of bioplastic carrier bags under industrial-scale composting conditions. *Polymers* **16**: 3450.
- Javed N., Muhammad S., Iram S., Ramay M.W., Jaffri S.B., Damak M., **Fekete Gy.**, Varga Zs., Székács A., Aleksza L. (2023): Analysis of fuel alternative products obtained by the pyrolysis of diverse types of plastic materials isolated from a dumpsite origin in Pakistan. *Polymers* **15**: 24.
- Üveges Zs., Damak M., Klátyik Sz., Ramay M.W., **Fekete Gy.**, Varga Zs., Gyuricza Cs., Székács A., Aleksza L. (2023): Biomethane potential in anaerobic biodegradation of commercial bioplastic materials. *Fermentation* **9**: 261.
- Gulyás M., Someus E., Klátyik Sz., Fuchs M., Varga Zs.I., Dér S., **Fekete Gy.**, Czinkota I., Székács A., Gyuricza Cs., Aleksza L. (2022): Effects of combined application of solid pyrolysis products and digestate on selected soil properties of arenosol and plant growth and composition in laboratory experiments. *Agronomy (Basel)* **12**: 1440.
- Harsányi E., Juhász Cs., Kovács E., Huzsvai L., Pintér R., **Fekete Gy.**, Varga Zs.I., Aleksza L., Gyuricza Cs. (2020): Evaluation of organic wastes as substrates for rearing *Zophobas morio*, *Tenebrio molitor*, and *Acheta domesticus* larvae as alternative feed supplements. *Insects* **11**: 604.

Hazai kiadású szakfolyóiratban megjelent idegen nyelvű tudományos folyóiratcikkek:

- Gulyás M., **Fekete Gy.**, Varga Zs., Dér S., Sebők A., Vojtela T., Aleksza L. (2022): Biogas potential and calorific value of different agricultural main and by-product. *Hungarian Agricultural Res.: Environ. Manag. Land Use Biodiversity* **3**: 11-15.
- Pintér R., **Fekete Gy.**, Varga Zs.I., Gyuricza Cs., Aleksza L. (2022): Evaluation of organic wastes as substrates for rearing *Zophobas morio*, *Tenebrio molitor*, and *Acheta domesticus* larvae as alternative feed supplements. *J. Cent. Eur. Green Innov.* **10**: 143-156.
- Pintér R., Aleksza L., **Fekete Gy.**, Béres A., Gyuricza Cs. (2021): Effect of different substrate mixtures on crude fat and crude protein content of

zophobas morio larvae. *Hungarian Agricultural Res.: Environ. Manag. Land Use Biodiversity* **30**: 13-16.

Hazai kiadású szakfolyóiratban megjelent magyar nyelvű tudományos folyóiratcikkek:

- Dálnoki A.B., Huszár Sz., Sebők A., **Fekete Gy.**, Czinkota I. (2017): Talaj és növény beltartalmi paramétereinek változása trágyakazelések hatására. *Talajvédelem* **2017**: 363-370.
- Járdi I., Pápay G., **Fekete Gy.**, S-Falusi E. (2017): Marhalegelők vegetációjának vizsgálata az Ipoly-völgy homoki gyepeiben. *Gyepgazdálkodási Közlemények* **15**: 9-21.
- Sebők A., Czinkota I., **Fekete Gy.**, Dálnoki A.B., Grósz J. (2017): Humuszoldat adszorpciós és deszorpciós kinetikájának meghatározása homokos talajon oszlopkísérlet segítségével. *Talajvédelem* **2017**: 251-260.
- Yadav D.V., Gulyás M., **Fekete Gy.**, Béres A., Czinkota I. (2016): Effects of digestate on growth and health of soil plant system. *Növénytermelés* **65**: 111-114.
- Fekete Gy.**, Issa I., Tolner L., Czinkota I., Tolner I.T. (2016): Investigation on the indirect correlation and synergistic effects of soil pH and moisture content detected by remote sensing. *Növénytermelés* **65**: 203-206.

Hazai kiadó által kiadott magyar nyelvű könyv, szerkesztőként:

- Aleksza L., **Fekete Gy.** (2023): A körforgásos gazdaságra történő átállás előkészítési feladatai a mezőgazdasági és zöldhulladékok esetében. (Aleksza L., **Fekete Gy.** szerk.) Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Gödöllő, Magyarország, 54 p.

Idegen nyelvű konferenciakiadványban megjelent összefoglalók:

- Rúbia Borges Silva L., **Fekete Gy.**, Varga Zs., Aleksza L., Kardos L. (2024): Sustainable remediation and valorization of pálinka spent wash: overcoming environmental challenges through composting in Hungary. *19th Carpathian Basin Environmental Science Conference, book of abstract*. HUN-REN Atommagkutató Intézet (Debrecen) pp. 39-40.
- Gulyás M., Someus E., Varga Zs., **Fekete Gy.**, Aleksza L. (2020): Effects of combined application of solid pyrolysis products and digestate on selected soil and plant properties in laboratory experiment. *Abstract book of the 19th Alps-Adria Scientific Workshop* (Wisła, Lengyelország) pp. 20-20.

Gulyás M., Tolner L., **Fekete Gy.**, Erdősi R., Czinkota I. (2018): Rapid biotest method in precision agriculture. *17th Alps-Adria Scientific Workshop: Abstract book* (Hnanice, Csehország) pp. 162-163.

Magyar nyelvű konferenciakiadványban megjelent összefoglalók:

Teski A., Wichmann B., Penksza K., **Fekete Gy.**, Kerényi-Nagy V. (2018): Kárpát-medencei rózsafajok alaktani vizsgálatai. *XII. Aktuális Flóra- és Vegetációkutatás a Kárpát-medencében - program és összefoglalók*. Debreceni Egyetem TTK Növénytani Tanszék (Debrecen). pp. 108.

Czinkota I., **Fekete Gy.**, Gulyás M., Tolner L., Sebők A., Köles P. (2016): Biomassza hamu alkalmazhatóságának vizsgálata talajsavanyúság javítására. *Talajtani Vándorgyűlés: "Okszerű talajhasználat - Talajvédelem" előadások és a posztterek összefoglalója*. Magyar Agrártudományi Egyesület Talajtani Társaság (Debrecen) pp. 215-222.

Tolner L., Rétháti G., Kovács A., Dálnoki A.B., **Fekete Gy.**, Czinkota I. (2016): Biodízelgyártás melléktermék (glicerín) hatása a talaj nitrogénformáira és az angolperje kezdeti fejlődésére. *5. Környezetkémiai Szimpózium, Program és előadáskivonatok* (Tihany) pp. 21-21.

Magyar nyelvű oktatási anyag:

Aleksza L., Varga Zs., **Fekete Gy.** (2023): *Komposztmester: A közösségi komposztálás kézikönyve*. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Gödöllő, 79 p.

Fekete György munkásságának összefoglalása (2025.01.19)
MTMT közlemény és idéző összefoglaló táblázat

Tudományos közlemények	Szám		Hivatkozások ¹	
	Összesen	Részletezve	Független	Összes
I. Tudományos folyóiratcikk	<u>13</u>			
külföldi kiadású szakfolyóiratban idegen nyelvű		<u>7</u>	<u>106</u>	<u>106</u>
külföldi kiadású szakfolyóiratban magyar nyelvű		0	0	0
hazai kiadású szakfolyóiratban idegen nyelvű		<u>3</u>	0	0
hazai kiadású szakfolyóiratban magyar nyelvű		<u>3</u>	<u>9</u>	<u>9</u>
II. Könyvek	<u>1</u>			
a) Könyv, szerzőként	0			
idegen nyelvű		0	0	0
magyar nyelvű		0	0	0
b) Könyv, szerkesztőként ²	<u>1</u>			
idegen nyelvű		0		
magyar nyelvű		<u>1</u>		
III. Könyvrészlet	0			
idegen nyelvű		0	0	0
magyar nyelvű		0	0	0
IV. Konferenciaközlemény folyóiratban vagy konferenciakötetben	<u>4</u>			
idegen nyelvű		<u>2</u>	0	0
magyar nyelvű		<u>2</u>	0	0
Közlemények összesen (I-IV.)	<u>18</u>		<u>115</u>	<u>115</u>
Absztrakt³	<u>10</u>		0	0
Kutatási adat	0		0	0
További tudományos művek⁴	<u>6</u>		0	0
Összes tudományos közlemény	<u>34</u>		<u>115</u>	<u>115</u>
Hirsch index⁵			<u>3</u>	<u>3</u>
Oktatási mű	<u>1</u>			
Felsőoktatási mű	0			
Felsőoktatási tankönyv idegen nyelvű		0	0	0
Felsőoktatási tankönyv magyar nyelvű		0	0	0
Felsőoktatási tankönyv része idegen nyelvű		0	0	0
Felsőoktatási tankönyv része magyar nyelvű		0	0	0
Oktatási anyag	<u>1</u>		0	0
Öltalmi formák	0		0	0
Alkotás	0		0	0
Ismeretterjesztő művek	0			
Folyóiratcikk		0	0	0
Könyvek		0	0	0
További ismeretterjesztő mű		0	0	0
Közérdekű vagy nem besorolt jellegű mű⁶	0		0	0
További közlemények⁷	0		0	0
Egyéb szerzőségű mű⁸	0		0	0
Idézők szerkesztett művekre			0	0
Idézők disszertációban, egyéb típusban			<u>8</u>	<u>8</u>
Összes közlemény és összes idézőik	<u>35</u>		<u>123</u>	<u>123</u>