

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

FEKETE GYÖRGY

Gödöllő

2025



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

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

DOKTORI (*PhD*) ÉRTEKEZÉS

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

學而不思則罔，思而不學則殆

„Gondolkodás nélkül tanulni: felesleges vesződség;
tanulás nélkül gondolkodni: veszedelmes.”

Konfuciusz (Beszélgetések és mondások)

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....	v
1 BEVEZETÉS	1
1.1 Globális kihívások	1
1.1.1 Népeségrobbanás	1
1.1.2 A szén-dioxid emisszió és a klímaváltozás	1
1.1.3 Eutrofizáció	4
1.2 Célkitűzések.....	6
2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1 Az algákban rejlő lehetőségek	8
2.1.1 Az algák szerepe a környezetünkben	8
2.1.2 Globális algatermelés	11
2.2 Mikroalga-termesztési módszerek	13
2.2.1 Természet-közei termesztés, helyszíni betakarítás	14
2.2.2 Nyílt medencés termesztés	14
2.2.3 Zárt rendszerű algatermesztés	15
2.3 Az algatermesztés követelményei	17
2.3.1 Az algafaj kiválasztása	17
2.3.2 Tápközeg	20
2.3.3 Szénforrás.....	21
2.3.4 pH	21
2.3.5 Hőmérséklet	21
2.3.6 Fény	22
2.3.7 Keverés.....	23
2.3.8 Bio-inhibitorok.....	23
2.3.9 A termesztő edényzet kialakítása	23
2.4 A mikroalga betakarítási technikák	23

2.5	Az algabiomassza lehetséges felhasználási módjai.....	29
2.6	Az algamérési technikák kihívásai	31
2.7	Az alga szén-megkötési technológiák	34
2.7.1	Szén-dioxid megkötési és tárolási (CCS) technológiák	34
2.7.2	A szén-dioxid elnyelése hamu kivonatokban.....	38
2.7.3	A mikroalga és a hamu kivonat integrált alkalmazása CO ₂ megkötésre	39
2.7.4	A biomassza felhasználási módok értékelése a szén-megkötés hatékonyságának szempontjából	43
2.7.5	A szén-megkötésre alkalmas <i>Chlorella vulgaris</i> mikroalga bemutatása	45
2.7.6	A szén-dioxid kezelés várható hatásai az alganövekedésre	46
3	ANYAG ÉS MÓDSZER	49
3.1.	A <i>Chlorella vulgaris</i> törzstenyészet fenntartása	49
3.2.	Az alkalmazott algabiomassza meghatározási módszerek bemutatása	50
3.2.1.	Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása	51
3.2.2.	Az algabiomassza bepárlással történő meghatározása.....	51
3.2.3.	Az algabiomassza meghatározása a magnéziumtartalom alapján.....	52
3.2.4.	Az algabiomassza meghatározása a klorofill-a-koncentráció alapján	53
3.2.5.	Az algabiomassza meghatározása a minták sejtszáma alapján.....	55
3.2.6.	Az algabiomassza meghatározása a gerjesztett klorofill-a fluoreszcencia mérése alapján	56
3.2.7.	Az algabiomassza meghatározása az optikai sűrűségének mérése alapján.....	57
3.2.8.	Az algabiomassza meghatározásra alkalmas módszerek eredményeinek statisztikai kiértékelése.....	57
3.3.	A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet bemutatása.....	58
3.3.1.	A fabiomassza tüzelésből származó hamu kivonat előállítása.....	58
3.3.2.	A modellkísérlet beállításai.....	59
3.3.3.	A pH-értékek alakulásának nyomonkövetése	61
3.3.4.	Az algabiomassza-koncentráció alakulásának nyomonkövetése	61
3.3.5.	Az oldott szerves széntartalom meghatározása saját fejlesztésű módszerrel	61

3.3.6.	A vizsgált mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeinek statisztikai kiértékelése.....	63
4	EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE.....	64
4.1	A különböző biomassa meghatározási módszerek összehasonlításának eredményei ..	64
4.1.1.	A szűréssel meghatározott algabiomassa-koncentrációk alakulása	64
4.1.2.	A bepárlási maradék alapján meghatározott algabiomassa-koncentrációk alakulása	65
4.1.3.	A meghatározott magnézium-koncentrációk alakulása.....	66
4.1.4.	A meghatározott klorofill-a-koncentrációk alakulása	66
4.1.5.	A digitális sejtszámlálás során meghatározott algasejt-koncentrációk alakulása ...	67
4.1.6.	Az algakoncentráció indukált klorofill-a-fluoreszcencia detektáláson alapuló meghatározásának eredményei.....	68
4.1.7.	Az algaszuszpenziók spektrofotometriával meghatározott optikai sűrűsége	68
4.2	A különböző biomassa meghatározási módszerek közötti feltárt korrelációk	71
4.2.1.	A korreláció pásztázás eredményei, a determinációs együtthatók megállapítása a teljes spektrumon.....	72
4.2.2.	Az algabiomassa becslésére ajánlott képlet.....	74
4.2.3.	Az exponenciális függvény alkalmazásának matematikai alapjai	76
4.3	A <i>C. vulgaris</i> mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményei	78
4.3.1	A <i>Chlorella vulgaris</i> szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során tapasztalt pH változások.....	80
4.3.2	A <i>Chlorella vulgaris</i> szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során tapasztalt algabiomassa változások	81
4.3.3	A <i>Chlorella vulgaris</i> szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során meghatározott változások az oldott szerves széntartalomban	83
5	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	87
5.1	A különböző biomassa meghatározási módszerek eredményeiből levont következtetések	87
5.1.1	A szűrésen és bepárlási maradékon alapuló biomassa meghatározás	87

5.1.2	A szűrésen és a klorofill-a-tartalom meghatározásán alapuló biomassza meghatározás.....	87
5.1.3	Az új, automatizált, digitális sejtszámlálási módszer	88
5.1.4	A <i>Chlorella vulgaris</i> algasejt magnézium- és klorofill-a-tartalma	88
5.1.5	A tanulmány eredményeinek lehetséges alkalmazási területei	90
5.2	A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeiből levonható következtetések	93
5.3	A modellkísérlet eredményeinek összevetése a szakirodalmi adatokkal	94
5.4	A szakirodalomban található alga hozam értékek kritikai áttekintése	97
5.5	Javaslatok	99
6	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	100
7	ÖSSZEFOGLALÁS.....	102
8	SUMMARY	105
M1:	IRODALOMJEGYZÉK.....	108
M2:	AZ ALGA TECHNOLÓGIA KUTATÁS TÖRTÉNETE	145
M3:	ALGAKUTATÁS MAGYARORSZÁGON.....	150
M4:	AZ ALGABIOMASSZA LEHETSÉGES FELHASZNÁLÁSI MÓDJAI IPARÁGAK SZERINT	155
M5:	A SZŰRÉSEL MEGHATÁROZOTT ALGABIOMASSZA EREDMÉNYEK.....	165
M6:	A BEPÁRLÁSI MARADÉK ALAPJÁN MEGHATÁROZOTT ALGABIOMASSZA EREDMÉNYEK	166
M7:	A MAGNÉZIUM KONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁS EREDMÉNYEI.....	168
M8:	A PH-ÉRTÉKEK ALAKULÁSA A MIKROALGA SZÉNFEVÉTELÉT VIZSGÁLÓ MODELLKÍSÉRLETBEN	169
M9:	AZ ALGABIOMASSZA KONCENTRÁCIÓK ALAKULÁSA A MIKROALGA SZÉNFEVÉTELÉT VIZSGÁLÓ MODELLKÍSÉRLETBEN	170
M10:	AZ OLDOTT SZERVETLEN SZÉNKONCENTRÁCIÓ MÉRÉS EREDMÉNYEI	172
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	173

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

ε	elnyelő közeg moláris abszorpciós együtthatója (L/g/cm)
ℓ	a fény által az anyagban megtett távolság (cm)
μ	fajlagos növekedés
A	abszorpciós együttható (-)
AF	auto-flokkuláció (<i>auto-flocculation</i>)
ATP	adenozin-trifoszfát
ATT	Algológiai Találkozó és Továbbképzés
BF	bio-flokkuláció (<i>bio-flocculation</i>)
B2B	cégek közötti kapcsolatokból realizálódó értékek (<i>business-to-business</i>)
B2C	cégek és a fogyasztók között realizálódó értékek (<i>business-to-consumer</i>)
c	az abszorbeáló részecskék koncentrációja (g/L) / az algabiomassza tömegkoncentráció (mg/dm ³)
CCS-technológia	CO ₂ megkötési és tárolási technológiák (<i>carbon capture and storage techniques</i>)
CFF	keresztáramú szűrés (<i>cross flow filtration</i>)
CH ₄	metán
CKD	cementégető kemence por (<i>cement kiln dust</i>)
CO ₂	szén-dioxid
DAF	diszpergált levegő flotáció (<i>dispersed air flotation</i>)
DC	dekanteres centrifugálás (<i>decanter centrifugation</i>)
DFS	dikroikus fluorométer rendszer (<i>dichroic fluorometer system</i>)
DIC	oldott szervetlen szén (<i>dissolved inorganic carbon</i>)
DSC	tálcás centrifugálás (<i>disc stack centrifugation</i>)
DVF	oldott levegő flotáció (<i>dissolved air flotation</i>)
EC	elektrolitikus koaguláció (<i>electrolytic coagulation</i>)
EFC	elektrolitikus flokkuláció (<i>electrolytic flocculation</i>)
EFT	elektrolitikus flotáció (<i>electrolytic flotation</i>)
EMOD	Európai Tengeri Megfigyelési és Adathálózat (<i>European Marine Observation and Data Network</i>)
ENSZ	Egyesült Nemzetek Szervezete (<i>United Nations</i>)
EU	Európai Unió
F	az fényelnyelés (-)
F _{max}	az adott algára jellemző maximális fényelnyelés (-)

FAO	Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezet (<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>)
FO	fluidikus oszcilláció (<i>fluidic oscillation</i>)
GtCO ₂ ekv.	gigatonna CO ₂ -egyenérték
HUN-REN	Magyar Kutatási Hálózat (<i>Hungarian Research Network</i>)
I ₀	a beeső fény intenzitása vagy energiája (lux)
I	az anyagon áthaladt fény intenzitása vagy energiája (lux)
IEA	Nemzetközi Energia Ügynökség (<i>International Energy Agency</i>)
k	az adott algára jellemző fényelnyelési állandó (-)
K	az integrációs konstans (-)
IF	szervetlen flokkuláció (<i>inorganic flocculation</i>)
JRC	Közös Kutatóközpont (<i>Joint Research Centre</i>)
LOD	kimutatási határ (<i>limit of detection</i>)
MTA	Magyar Tudományos Akadémia
N ₁	algabiomassza-koncentráció a kiindulási időpontban (mg/L)
N ₂	algabiomassza-koncentráció a végső időpontban (mg/L)
N:P arány	nitrogén-foszfor arány
OF	szerves flokkuláció (<i>organic flocculation</i>)
PBR	fotobioreaktor (<i>photobioreactor</i>)
PF	présszűrés (<i>pressure filtration</i>)
PHB	poli(3-hidroxi-butirát)
ppm	milliomod rész (<i>part per million</i>)
PVDF	polivinil-difluorid
RFU	relatív fluoreszcencia egység (<i>relative fluorescence units</i>)
S	ülepítés (<i>sedimentation</i>)
sz.a.	szárazanyag-tartalom
t ₂ -t ₁	mérési időintervallum (nap)
td	duplázódási idő (nap)
UNESCO	Egyesült Nemzetek Nevelésügyi, Tudományos és Kulturális Szervezete (<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
UV-sugárzás	ultraviola sugárzás
VF	vákuumos szűrés (<i>cacuum filtration</i>)
WBA	faalapú biomassza hamu (<i>wood biomass ash</i>)

1 BEVEZETÉS

1.1 Globális kihívások

1.1.1 Népeségrobbanás

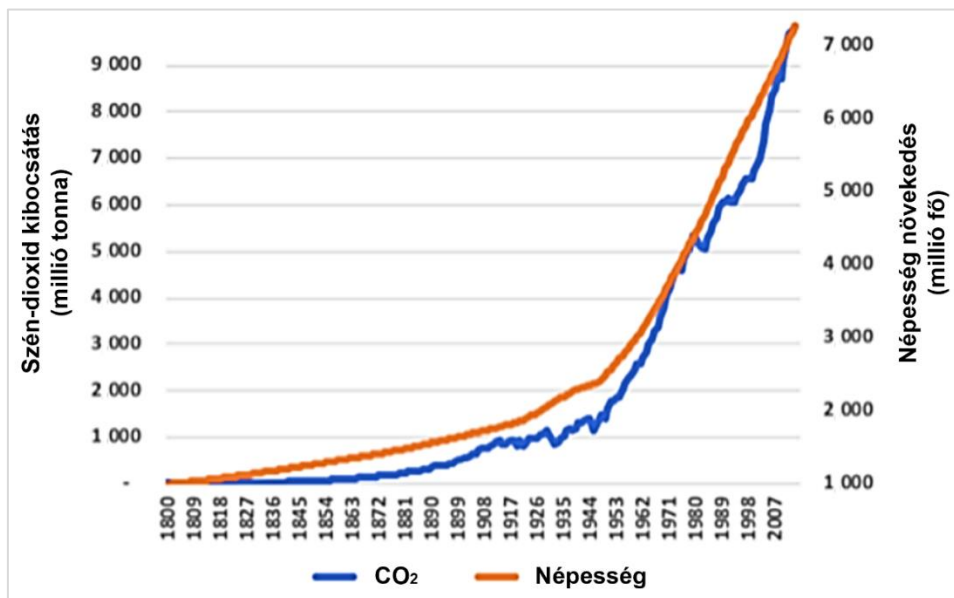
A népeségrobbanás a 20. század második felében vált globális jelentőségűvé, amikor a világ népessége exponenciálisan növekedett. 1800-ban még csak 1 milliárd fő élt a Földön, de az ipari forradalom és az orvostudomány fejlődése miatt gyors növekedés indult el. 1950-ben a világ népessége 2,5 milliárd volt, 1987-re elérte az 5 milliárdot, 2025 januárjában pedig 8,198 milliárd főt (WORLD BANK GROUP 2022; WORLDOMETERS 2025). Az ENSZ előrejelzése szerint 2050-re 9,7 milliárdra nőhet (UNITED NATIONS 2022). Európában és Észak-Amerikában lassul a növekedés, míg Afrikában és Dél-Ázsiában továbbra is jelentős marad.

A népeség-növekedés következménye a földhasználat drasztikus változása. Az élelmiszer-termelés érdekében az erdőirtás jelentős méreteket ölt, évente körülbelül 10 millió hektár erdőt vágnak ki (FAO 2021). Az urbanizáció hatására a termőföldek helyét egyre nagyobb arányban városi infrastruktúra veszi át, 2050-re a népesség 68%-a városokban fog élni (UNITED NATIONS 2022). Az energiafogyasztás szintén növekszik: 1971 és 2020 között több mint háromszorosára nőtt, és 2021-ben 82%-át fosszilis tüzelőanyagok biztosították (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2021a; BP 2022). A víz- és élelmiszerellátás kulcsfontosságú kérdéssé vált. A globális vízigény évente 1%-kal nő, miközben egyre több régió szenved vízhiánytól (UNESCO 2022). A gyors népeség-növekedés társadalmi problémákat is okoz, például szegénységet, munkanélküliséget és elégtelen egészségügyi szolgáltatásokat (BLOOM 2011). A megoldáshoz fenntartható városfejlesztésre, megújuló energiákra és erőforrás-hatékonyság növelésére van szükség (SETO *et al.* 2012).

1.1.2 A szén-dioxid emisszió és a klímaváltozás

Ahogy a Föld népessége növekszik, úgy azzal együtt nő a globális CO₂-kibocsátás is (1. ábra), ami évtizedek óta kritikus környezeti probléma, amelyet nagyrészt az emberi tevékenységek, többek között a fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj és földgáz) elégetése hajt az energia-termelésben, a közlekedésben és az ipari folyamatokban történő felhasználások során. További szén-kibocsátó a mezőgazdaság, a hulladékkezelés, a szeméttégetés, a lakossági szektor és a bányászat is (FILONCHYK *et al.* 2024). A CO₂ globális légköri

koncentrációja az 1700-as években meghatározott 280 ppm-ről, 380 ppm-re növekedett 2005-re (RAUPACH *et al.* 2007), majd 2023-ra 427 ppm-re emelkedett (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION 2024) (1. ábra). A CO₂ légköri élettartama 50 és 200 év között mozog (INMAN 2008). Azonban a kibocsátott CO₂-nak csupán körülbelül 45%-a marad a légkörben (RAUPACH *et al.* 2014), míg a többit az óceán (25%), valamint szárazföldi ökoszisztémák, például erdők (30%) nyelik el (WATSON *et al.* 2020, DUFFY *et al.* 2021). Ez az egyensúly évente ingadozhat a természetes éghajlati ciklusok és más befolyásoló tényezők hatására (PETERS *et al.* 2017). Az erdőirtás szintén hozzájárul a légköri CO₂-szint növekedéséhez, mivel az erdők jelentős szerepet játszanak a CO₂ megkötésében (KOERNER és KLOPATEK 2002, RAIHAN és TUSPEKOVA 2022).



1. ábra: A világ népessége és a globális széndioxid-kibocsátás közötti összefüggések (PETERSON 2019)

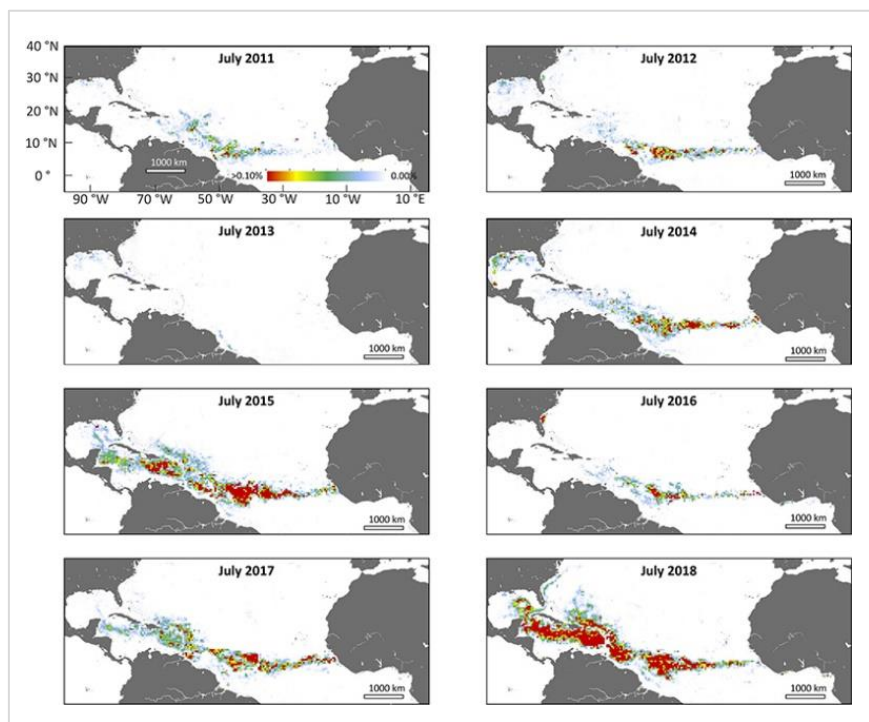
Az elsődleges üvegházhatású gázok (CO₂, metán és dinitrogén-oxid) kibocsátása az éghajlatváltozás fő hajtóereje, mivel ezek a gázok csapdába ejtik és visszatartják a hősugárzást a Föld légkörében, ami globális felmelegedéshez vezet (FILONCHYK *et al.* 2024). A kibocsátási források széles skálája kiemeli az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére irányuló stratégiák elfogadásának fontosságát, amelyek elengedhetetlenek az éghajlatváltozás kezeléséhez és a fenntartható fejlődés elősegítéséhez. A kibocsátások csökkentésére irányuló nemzetközi erőfeszítések, különösen az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv és a 2015-ös Párizsi Megállapodás, döntő szerepet játszanak az éghajlatváltozás elleni közös globális fellépés kialakításában (LAU *et al.* 2012). Eközben az Európai Unió (EU) 2030-ig

nettó 55%-os kibocsátáscsökkentési célt fogalmazott meg, amely alapot teremt az EU számára, hogy 2050-re elérje a klímasemlegességet (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL 2021). Bár néhány ország és ipari szektor jelentős lépéseket tett a szénlábnyom csökkentése érdekében – például megújuló energiaforrások (pl. szél-, nap-, vízenergia), energiahatékonyság, CO₂-megkötési technológiák és erdőtelepítés alkalmazásával –, a globális CO₂-kibocsátás továbbra is növekszik, különösen a fejlődő gazdaságokban, ami komoly kihívást jelent az éghajlatvédelmi intézkedések számára. A teljes kibocsátás 2022-ben elérte a 38,52 gigatonna CO₂-egyenértéket (GtCO₂ ekv.), ami sürgeti a közös erőfeszítéseket az éghajlatváltozás káros hatásainak mérséklésére (FILONCHYK *et al.* 2024). Az ipar és a fosszilis tüzelőanyagokból származó globális CO₂-kibocsátás 2022-ben 37,15 milliárd tonnát (GtCO₂) tett ki, míg 2023-ban 1,1%-kal növekedett, új rekordot érve el (37,55 GtCO₂) (STATISTA 2024). A Globális Légkörkutató Emissziós Adatbázis (*Emissions Database for Global Atmospheric Research*) szerint az energiatermelési ágazat a legnagyobb kibocsátó, a teljes kibocsátás 38,1%-ával, amelyet a közlekedés (20,7%) és az ipari égés (17%) követ (CRIPPA *et al.* 2018, FILONCHYK *et al.* 2024).

Az 1970-es évek elejétől 2022-ig az üvegházhatású gázok kibocsátásának folyamatos növekedése figyelhető meg (a CO₂ az összkibocsátás 73,5%-át teszi ki). Ugyanakkor a COVID-19 világjárvány miatt 2020-ban átmeneti csökkenés történt a CO₂-kibocsátásban, de 2021-től újabb növekedést tapasztaltak (LE QUÉRÉ *et al.* 2020, LIU *et al.* 2020, RAY *et al.* 2022). A légköri CO₂-szint folyamatos növekedése súlyos kockázatokat jelent, beleértve a biodiverzitás csökkenését, a tengerszint emelkedését és a szélsőséges időjárási események gyakoribbá válását. Az észlelt folyamatosan növekedő tendencia rámutat a globális együttműködés és hatékony intézkedések sürgető szükségességére a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése érdekében, hogy mérsékeljék az antropogén tevékenységek globális éghajlatra és környezetre gyakorolt káros hatásait (FILONCHYK *et al.* 2024).

1.1.3 Eutrofizáció

A bőséges tápanyag-ellátottságú (eutróf) vizekben gyakran megfigyelhető az a jelenség, hogy abban elszaporodnak a parányi méretű, fotoszintetikus szervezetek, az ún. mikroalgák. Az eutrofizációs folyamatnak ezt a jelenségét algavirágzásnak nevezzük (GLIBERT *et al.* 2005, FELFÖLDY 1974). Az algavirágzás időtartama változó, kialakulását a víztér sajátosságai, a környezeti tényezők, a geológiai viszonyok, valamint az adott faj morfológiai, fiziológiai és genetikai jellemzői befolyásolják (HEISLER *et al.* 2008, ESQUENAZI *et al.* 2011). A foszfát- és nitráterhelés növekedése – műtrágyák és foszforalapú mosószerek révén – elősegítette a toxikus algavirágzások gyakoribbá válását (VASAS 2014). Egyik legismertebb példája a „Nagy Atlanti Golf-füv” (2. ábra), amely 8850 km hosszú és több mint 20 millió tonnányi algabiomasszát tartalmaz (WANG *et al.* 2019).



2. ábra: A Nagy Atlanti Golf-füv növekedése (WANG *et al.* 2019)

Az algavirágzás hatásai között szerepel az oxigénháztartás zavara. Nappal az algák oxigént termelnek, éjszaka azonban fogyasztanak. A tömeges elhalásuk oxigénhiányt, halpusztulást okozhat (HEISLER *et al.* 2008). A víz rétegződése csökkentheti az alsóbb rétegek oxigénellátását, amit egy hirtelen keveredés tovább súlyosbíthat (ELLIOTT 2010). Meleg időben a víz kevesebb oxigént tárol, borult időben pedig csökken a fotoszintézis, ami fokozza a problémát (FRESHWATER AQUACULTURE 2025).

Toxikus algavirágzás

Toxikus algavirágzásnak („harmful algal bloom”) nevezzük azt az állapotot, amikor az algák, vagy az elpusztulásukkor őket bontó mikroorganizmusok mérgező anyagokat termelnek, vagy oxigénhiányos környezetet hoznak létre (SELLNER *et al.* 2003). A cianobaktériumok gyakran felelősek ezekért a jelenségekért, amelyek szezonális mintázatot mutatnak (CHORUS és BARTAM 1999). A cianobaktériumok számára az optimális N:P arány alacsonyabb, ami elősegíti dominanciájukat (PAERL 1988). Az általuk termelt toxinok közé tartoznak a mikrocisztimek, anatoxinok és szaxitoxinok (VASAS 2014). Utóbbi olyan erős mérgező, hogy a hidegháború alatt a pilóták fogába tömték, hogy elfogásuk esetén végezhesse magukkal (TESTER *et al.* 2020).

A toxikus algavirágzások hatása akár hónapokkal később is érezhető, mivel a táplálékláncban felhalmozódhatnak (ZOHDİ és ABBASPOUR 2019). Erre példa a vörös dagály („red tide”) jelenség, amely a tengerek színét markánsan megváltoztatja, és súlyos mérgezési hullámokat okoz (3. ábra). Egy híres eset 1961-ben történt Kaliforniában, amikor algatoxinok miatt tengeri madarak „megőrültek” és a partmenti szikláknak csapódtak, ami Alfred Hitchcock „Madarak” című 1963-ban megjelent filmjét is ihlette (BARGU *et al.* 2012).



3. ábra: A vörös dagály („red tide”) típusú toxikus algavirágzás (MICROBIAL LIFE 2006)

Magyarországi algavirágzások

Az első dokumentált hazai vízvirágzást Sebestyén Olga figyelte meg 1934-ben a Balaton Kis-öblében (VASAS 2014). Az 1970-es években az *Aphanizomenon flos-aquae* cianobaktérium okozott algavirágzást, míg 1982-ben, 1992-ben és 1994-ben a *Raphidiopsis raciborskii* is megjelent (PADISÁK és ISTVÁNOVICS 1995).

1.2 Célkitűzések

Az algák szén-dioxid megkötő és tároló képessége már régről ismert, a Föld története során a légkör eredeti, redukzív összetételét már jelentősen átalakították (PRASAD *et al.* 2021). Ugyanakkor láthatjuk azt is, hogy amint a növekedésük számára optimálisak a körülmények, rendkívül rövid időn belül hatalmas biomassza tömeget tudnak termelni. Ha ezt az óriási potenciált a megfelelő módon kiaknáznánk, akkor olyan globális kihívásokra adhatnánk megoldást, mint az ipari forradalom óta megfigyelt globális többlet CO₂ kibocsátás, vagy a szennyvíztisztítás oldott-tápelem eltávolítási feladata. Emellett az előállított biomassza talajon történő alkalmazása hozzájárulhat azok szervesanyagtartalmának növekedéséhez, aggregátum stabilitásának és vízkapacitásának javításához. Amennyiben a műanyag iparban használjuk fel a biomasszát, úgy pedig fenntartható, karbonsemleges alapanyaghoz juttathatjuk a szektort.

Természetesen egy doktori disszertáció keretén belül nem adódik a lehetőség, hogy ezekre a kihívásokra azonnal választ adjunk, ezért a dolgozat legfőbb célkitűzése az, hogy legalább valamilyen formában hozzájáruljon az alga környezettechnológiák és azon belül is a mikroalga alapú CO₂ csökkentési technikák fejlesztéséhez, hogy azok alkalmazása minél szélesebb körben el tudjon terjedni. Ezt a kitűzött célt két, egymástól független modellkísérlet lefuttatásával szándékoztam elérni a kutatásaim során.

Az első modellkísérletben a nagy sűrűségű algatermesztő rendszerek egyik alapvető kihívására, a biomassza koncentráció gyors, egyszerű és mintakímélő módjára kerestem választ UV-VIS spektrofotometriás módszer fejlesztésével. A kísérletben a kitűzött célom az volt, hogy egy hígítási sort készítek az alga szuszpenzióból és a sorozat elemeinek biomassza koncentrációját és azok fényintenzitás csökkentő hatását párhuzamosan megmérve egy korrelációt állítok fel közöttük. Hogy ezt megtehessem, első lépésben a mérési hullámhosszat kell kiválasztani, így a matematikailag is igazolható, megfelelő hullámhossz is egy fontos célkitűzés volt. Másodlagos célkitűzésként az optikai sűrűség alapú becslési módszer egyéb, biomassza koncentrációt jellemző paraméterekre (mint pl. sejtszám, a klorofill-A, vagy a magnézium koncentráció) alkalmazható hullámhosszainak megállapítását terveztem megállapítani. Ezért ezeket az adatokat szintén meg kellett határoznom a hígítási sor elemeire. Ezek kapcsán felmerült egy harmadlagos célkitűzés is: a rendkívül idő és munkaigényes, valamint sűrű algák esetében igencsak emberi hibalehetőséggel terhelt sejtszámlálási módszer továbbfejlesztése egy pixelszámlálás alapú, digitális képfeldolgozást alkalmazó eljárás kidolgozása.

A második modellkísérletben a korábbi kísérlethez kiválasztott algafaj, a *Chlorella vulgaris* szénmegkötő képességének vizsgálatát tűztem ki célul. Ehhez első lépésben a szakirodalom alapján ki kellett választani a modellezni kívánt termesztő rendszert, amely esetében a laboratóriumi eredményeket felhasználva működni fog a méretnövelés és az üzemi szintű alkalmazás az iparban. Ebből a célból tehát a zárt termesztő rendszerre (fotobioreaktor) esett a választás, amelyben lúgos abszorbens alkalmazásával, szétválasztott rendszerben történik a CO₂ leválasztása és az algatermesztés. A kísérletben fontos célkitűzés volt, hogy ne vegyszert használjak föl a lúgos közeg előállítására, hanem olyan anyagot, amely nem jelent többlet költséget sem a megvásárlása, sem pedig a használata utáni hulladékkezelés révén. Így esett a választás a fabiomassa égetéskor melléktermékként keletkező hamura, amelynek lúgos kémhatása jól ismert. Ennek felhasználásával a kutatás hozzájárulhat a biomassa alapú körforgásos gazdasági modell elterjedéséhez. A kísérletben kitűzött cél volt bemutatni, hogy a hamu kivonat, vagy az ebben történő CO₂ elnyelés okoz-e toxikus hatást az algákra, illetve amennyiben nem, akkor azok képesek-e hasznosítani az oldat széntartalmát. A kísérletben 5 különböző CO₂ és hamu kivonat kezelés alkalmazása mellett szándékoztam kimutatni a fabiomassa hamu kivonat optimalizális koncentrációját, és annak az algasejtek növekedésére és szénfelvételére gyakorolt serkentő vagy gátló hatásait. Utóbbi demonstrálásához másodlagos célkitűzésként egy olyan új módszer kidolgozását terveztem megvalósítani, amely alkalmas a hamu kivonat oldott szerves széntartalmának meghatározására a nyomás változás monitorozására rendszeresített *OxiTop* respirométer készülékkel.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Az algákban rejlő lehetőségek

2.1.1 Az algák szerepe a környezetünkben

A mikroalgák, a vízi és szárazföldi közeg apró erőműveiként széleskörű alkalmazási területüknek köszönhetően forradalmasítják a különböző tudományos diszciplínákat (MUTSCHLECHNER *et al.* 1955, DE MENDONCA *et al.* 2021, LOBUS 2022, JASSEY *et al.* 2022). Mikroszkopikus méretük ellenére kritikus szerepet játszanak a Föld ökoszisztémájában és számos lehetőséget kínálnak a globális kihívások megoldására (CHISTI 2020, BOURGOUGNON *et al.* 2021, CAROPPO és PAGLIARA 2022). Hogy mi mindent köszönhetünk az algáknak, azt a Russell Leonard Chapman Professzortól származó idézet jól összefoglalja: „Az algák a bolygó életének legkorábbi napjai óta hasznosak az emberiség számára – amikor a kékalgák megváltoztatták a bolygó légkörét és elindították az eukarióta szervezetek, köztük az emberek fejlődését. A kréta korszakban ismét segítettek nekünk, amikor a jelenlegi fő olaj- és gázlelőhelyeinket megtermelték a tengeri algák. Jelenleg a bolygó oxigénjének mintegy felét biztosítják, ami áldás azoknak, akik lélegzünk, és közvetlenül vagy közvetve ők adják nekünk az összes táplálékunkat. Az a tény, hogy az algák a megújuló bioüzemanyagok potenciális forrásai is, még fontosabbá teszi a világ legfontosabb 'növény'-eit.” (CHAPMAN 2013).

2002-ben az Oxfordi Egyetem munkatársai egy 3,5 milliárd éves, Nyugat-Ausztráliából származó kőzetmintában különféle mikroszkopikus baktériumok, köztük fotoszintetikus cianobaktériumok mikrofoszfiliáit mutatták ki, amivel bizonyítani tudták, hogy az első algák a Föld történetének már egy igen korai szakaszában megjelentek (DAVIS 2004) (4. ábra). Míg kezdetben a vas(II)-oxid és különböző szerves anyagok biztosították az algák által termelt szabad oxigén folyamatos megkötését körülbelül 2,4 milliárd évvel ezelőttig, majd ezen ásványok telítődtek és nem voltak képesek több oxigént megkötni. Ezzel megkezdődhetett az oxigén felgyülemzése a légkörben. A nagy oxigenizációs esemény („*Great Oxygenation Event*”), más néven oxigénkatasztrófa vagy oxigénkrízis, a paleoproterozoikum földtörténeti idő során, körülbelül 2,4 milliárd évvel ezelőtt történt drasztikus környezeti változás volt, melynek során jelentősen megnőtt a Föld légkörének molekuláris oxigéntartalma (LYONS *et al.* 2014). Az oxigén szintjének emelkedése elősegítette az ózonréteg kialakulását, amely védelmet nyújtott az UV-sugárzással szemben és lehetővé tette az élet szárazföldi megjelenését (KNOLL 2003). Az evolúciósan újabbnak

számító mikroalgák, különösen a fitoplankton tagjai, a víztestek felszíni rétegeiben találhatók, ahol a fotoszintézis során oxigént termelnek. A megtermelt oxigén az atmoszférába kerül, miközben a CO₂ egy része szerves anyaggá alakul. A kutatások szerint a fitoplankton éves szinten körülbelül 45 gigatonna szerves szenet termel, ami az összes globális primer produkció jelentős részét teszi ki (FALKOWSKI *et al.* 1998).

Jelenlegi becslések alapján, a légkör oxigénjének közel 50%-a az óceánokból származik, a mikroalgák és a cianobaktériumok fotoszintetikus aktivitásának következtében (PREISIG és ANDERSEN 2005, WEST 2022, GRÉGOIRE *et al.* 2023). Az algák jelentős mennyiségű CO₂-t képesek megkötni és felhasználni, így csökkentve az üvegházhatású gázok szintjét és ezzel mérsékelve a klímaváltozás káros hatásait (JUNEJA *et al.* 2013, SADVAKASOVA *et al.* 2023). A mikroalgák oxigéntermelő képessége nemcsak ökológiai, hanem gazdasági szempontból is fontos. Az algák biotechnológiai alkalmazásai közé tartozik a bioüzemanyagok előállítása, a CCS-technológiák, valamint az élelmiszer- és gyógyszeripari felhasználások (SPOLAORE *et al.* 2006).



4. ábra: Sztromatolitok: mészkőből és cianobaktériumokból képződött kőzetek a Cápa-Öbölben, Nyugat-Ausztrália partjainál (BRITANNICA 2025)

Az algák a fosszilis szén, például a kőolajban és földgázban található szén eredeti forrásai (PREISIG és ANDERSEN 2005). Gyors alkalmazkodásra képesek, továbbá exponenciálisan képesek növekedni komplex természetes élőhelyeken és akár extrém körülmények között a különböző fajok morfológiai, fiziológiai és szerkezeti sokféleségének köszönhetően (HAN *et al.* 2013, ZHOU *et al.* 2014, SINGH és SINGH 2015, MOBIN és ALAM 2017, NAYAKA *et al.* 2017). Gyakorlati szempontból az algák az óceánok – a Föld felszínének 71%-át borító terület – egyetlen elsődleges termelői. Az óceánok alatt nincsenek mezők vagy erdők, így az élet a tengerekben közvetlenül vagy közvetve a mikroszkopikus

algákra és a tengeri moszatokra támaszkodik (PREISIG és ANDERSEN 2005). A vízi ökoszisztémák algaközösségei tehát alapvető szerepet játszanak az táplálékláncokban és a különböző tápanyagszállítási folyamatokban (SCHAFFER és SEBETICH 2004, JYOTHI *et al.* 2016, CHISTI 2020, B-BÉRES *et al.* 2023). Valójában az óceánokban bármely adott időpontban körülbelül $6,25 \times 10^{25}$ mikroalga sejt található. Ha ezek átlagos átmérője 2 μm , akkor a sejtek térfogata 8,1 millió m^3 -t tenne ki (PREISIG és ANDERSEN 2005). Feltéve, hogy a sejtek naponta egyszer osztódnak, az óceánok minden nap kitermelnek egy még egyszer ekkora térfogatú biomasszát. A szárazföldi környezettől eltérően, ahol a biomassa felhalmozódik, a fogyasztók az óceánokban minden nap elfogyasztják ezt az óriási mennyiségű algát (PREISIG és ANDERSEN 2005).

Az algasűrűség, mint az eutrofizáció szintjének mutatója kulcsfontosságú paraméter a vízminőség értékelésében (BALLAH *et al.* 2019, SURESH *et al.* 2023), csakúgy, mint a sikeres termelékenység paramétereként az alga technológiákban. Azonban számos faj nagy érzékenységet mutat a szennyezőanyagok toxikus hatásaival szemben, így a különböző algafajokat széles körben alkalmazzák az ökotoxikológiai vizsgálatok során a vízszennyező anyagok toxicitásának értékelésére vagy bioindikátorként a vízszennyezés kimutatására (SILVA *et al.* 2009, WU *et al.* 2017, AMIN *et al.* 2022, LÁZÁR *et al.* 2023, NGUYEN *et al.* 2023). A mikroalgák hatékony eszközként szolgálhatnak a tápanyagok, nehézfémek és egyéb szennyező anyagok eltávolítására is a különböző természetes vizekből és a szennyvízből, továbbá hatékonyan alkalmazhatók a bioremediációs technikák tervezése, illetve kivitelezése során (LEONG és CHANG 2020, ELISABETH *et al.* 2021, BLANCO-VIEITES *et al.* 2022, UMAMAHESWARI *et al.* 2023, MAHLANGU *et al.* 2024).

A tudományosan leírt algafajok száma 2012-ben 70 000 volt, de egyes becslések szerint az összes faj száma elérheti akár a kétmilliót is (GUIRY 2012). Az algák nem képeznek egy közös taxonómiai csoportot, amelybe mindannyian beférnek, annak köszönhetően, hogy vannak közöttük prokarióta (cianobaktériumok) csoportok, míg többségüket az eukarióta szervezetekhez sorolják (VERESNÉ 2010). Alapvető közös tulajdonságuk, hogy valamilyen fotoszintetikus pigmenttel rendelkeznek. Az algák csoportosítása történhet a fotoszintetikus pigmentek összetétele, a fotoszintézis eredményeképpen keletkezett tartalék tápanyagok előfordulása, az ostorok mikroszkópos szerkezete és a testszerveződésük alapján (HODAI 2015). A színanyagok alapján elsősorban a *Chlorophyta*, a *Chromophyta* és a *Rhodophyta* csoportokat különíthetjük el, de a zöld színű *Euglenophyta*, a barna *Dinophyta*, valamint a *Cryptophyta* csoportok különleges tulajdonságaik és bizonytalan helyzetük miatt külön tárgyalást igényelnek (HODAI 2015).

Jelen tanulmánynak nem célja az algák egyes csoportjait ennél mélyebb szinten ismertetni. Az algák rendszertani besorolása sokszor heves viták tárgyát képezi még a legmagasabb szinteken is (LEITE és HALLENBECK 2012). Míg korábban két birodalomra (CHATTON 1938), majd később 4, 5, vagy 6 országra (COPELAND 1956, WHITTAKER 1969, BALCH *et al.* 1977), napjainkban három doménre (WOESE *et al.* 1990) történik az élőlények felosztása. A dolgozatomban kizárólag az egyes, gazdasági szempontból fontos algafajokat mutatom be. Az alga technológia kutatás történetét a 2. melléklet (M2), a hazai algakutató műhelyek tevékenységét – a teljesség igénye nélkül – pedig a 3. számú melléklet (M3) foglalja össze.

2.1.2 Globális algatermelés

A makroalga-biomassza éves termelése világszerte növekedett: 1950-ben 555 ezer tonna volt, míg 2016-ra 32,67 millió tonnára emelkedett. A globális termelés túlnyomórészt akvakultúrából származik (2016-ban 97%). Az EU algatermelése 2016-ban a globális termelés mindössze 0,28%-át tette ki, míg Norvégia és Izland további 0,57%-kal járult hozzá. Ezzel szemben Európában a vadon élő állományok betakarítása dominál, ami 2016-ban a makroalgabiomassza 98%-át adta (ARAÚJO 2021). A globális mikroalga-termelés évi 50 000 tonna körül mozog, főként öt faj (*Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus* és *Nannochloropsis*) termesztésével. A globális mikroalgapiacot 2021-ben 10,2 milliárd USD értékre becsülték (ARAÚJO 2021). Az EU-ban 126 algatermelő cég működik, amelyek 144 termelőüzemet üzemeltetnek. Az üzemek 57%-a makroalgákat, míg 43%-a mikroalgákat termel (EUROPEAN COMMISSION 2019). Európában a 87 vállalkozás által üzemeltetett 89 mikroalga-termelő egység 31%-a, 7 vállalkozás foglalkozott *Chlorella*-fajokkal. A legtöbb cég Franciaországban található, amelyet Spanyolország, Írország és Németország követ. Franciaországban, Spanyolországban, Portugáliában és Hollandiában hasonló arányban találhatók makro- és mikroalgatermelők. Németországban, Olaszországban és Ausztriában a mikroalga-termelés dominál, míg Írországban, Dániában és Norvégiában a makroalgák termesztése jellemző. Az Európában megtermelt mikroalga-biomassza felhasználását tekintve az élelmiszer- és takarmányágazat a vállalkozások több, mint 54%-át teszik ki, amelyből 23% étrend-kiegészítőket, 19% állati takarmányt készít, míg a fennmaradó 12% emberi élelmiszer előállításával foglalkozik. A kozmetikai ipar az ágazati vállalkozások 19%-át adta, míg a gyógyszeripar 8%-ot, a műtrágya és biostimuláns gyártók pedig 7%-ot fednek le (VAZQUEZ és SANCHEZ 2022).

A 2016–2020 évek átlagos értékeit tekintve a csak mikroalgákra fókuszáló cégek megtermelt forgalma több, mint 31 millió eurót tett ki, míg a FAO (2022) becsült adatai alapján az előállított biomassa mindössze 5 tonna évente. Ez azonban azt jelentené, hogy a biomasszát a vállalatok több, mint 2 milliárd Ft/tonna áron értékesítették, ami természetesen irreális adat, de jól rávilágít az adatgyűjtés hiányosságaira. Utóbbit támasztja alá Araújo tanulmánya is (2021), amelyben jelzi, hogy a hivatalos statisztikák a mikroalgák termelési mennyiségéről szinte egyáltalán nem állnak rendelkezésre európai szinten, továbbá a FAO és/vagy az Eurostat által rendelkezésre bocsátott adatok korlátozottak és töredékesek. A hivatkozott tanulmány adatai szerint az EU-ban hozzávetőlegesen 182 tonna száraz tömegű (sz.a.) mikroalgát és 142 tonna (sz.a.) *Spirulina*-t állítottak elő. A *Chlorella* spp. és a *Haematococcus pluvialis* a legnagyobb mennyiségben termelt mikroalgák, ugyanis a teljes mennyiség több, mint 80%-át teszik ki a tanulmányban összegyűjtött értékek alapján. Az előállított mennyiségekre vonatkozó információkat óvatosan kell kezelni, mivel az adatok sok esetben a termelési értékek becslésein alapulnak és néhány országot, illetve mikroalgákat termelő vállalatot nem vettek figyelembe az összesítő tanulmányban (ARAÚJO 2021).

Az algatermelőkkel folytatott konzultációk alapján a *Chlorella* spp. és a *Spirulina* (az élelmiszerek és étrend-kiegészítők piacán leginkább keresett két faj) B2B (*business-to-business*, cégek közötti kapcsolatokból származó) értékei (száraz tömegben) 25–50 euró/kg, illetve 30–70 euró/kg között mozognak. Ezzel szemben a B2C (*business-to-consumer*, cégek és a fogyasztók között realizálódó) értékek mindkét faj esetében 150–280 euró/kg között alakulnak (a magasabb értékek a kis kiszerelésű, késztermékekre vonatkoznak) (ARAÚJO 2021). Szintén a szektor adatgyűjtési nehézségeiről számol az Európai Bizottság (*European Commission, EC*) Közös Kutatóközpontja (*Joint Research Centre, JRC*) egy 2019-ben készített jelentésében, amiben a makroalgákkal ellentétben a mikroalgák mennyiségéről egyáltalán nem található információ európai viszonylatban (EUROPEAN COMMISSION 2019). A jelentés által összefoglalt ismeretbeli hiányosságok az alábbiak:

1. A mikroalga-biomassa termelésére vonatkozó adatok nagyon töredezettek, és nehezen hozzáférhetők.
2. Az FAO és az Eurostat statisztikái az európai makroalga-biomassa termeléséről hiányosak, illetve nem részletezik az egyes országokra, fajokra, évekre, valamint termelési módszerekre vonatkozó adatokat.

3. Az Európai Alga Termelők Adatbázisa, amelyet a *EC JRC* és az Európai Tengeri Megfigyelési és Adathálózat (*European Marine Observation and Data Network, EMOD*) közös kezdeményezése hozott létre, még nem teljes. A jelenleg elérhető eredmények egy első próbálkozást képviselnek az európai algatermelési egységek feltérképezésére. Az adatbázis tartalmazza a termelési egységek helyét, az előállított organizmusokat és az alkalmazott termelési módszereket.
4. További bizonyítékokra van szükség a vadon élő erőforrások természetes dinamikájáról, a betakarítási módszerek hatásáról, valamint az akvakultúrák termelés növekedési potenciáljáról, hogy támogassák az algaágazat fenntartható fejlődését Európában (EUROPEAN COMMISSION 2019).

2.2 Mikroalga-termesztési módszerek

Az ipari biomassa gyűjtése vadon élő állományokból vagy akvakultúra termeszéssel történik. A makroalgák begyűjtése kézi, búvár vagy mechanikus módszerekkel zajlik, főleg Európában. Az algatermesztés történhet tartályokban, tavakban vagy tengeri struktúrákon. Az integrált multitrófikus akvakultúra csökkenti a környezeti hatásokat. Európában az *Alaria esculenta*, *Palmaria palmata*, *Saccharina latissima* és *Ulva spp.* elterjedtek (FAO 2020).

A mikroalgák az akvakultúra alapjai, filogenetikailag sokszínűek, köztük cianobaktériumok is vannak. Nemcsak vízben, hanem talajon és sziklákon is növekednek. Hasznosításuk 2000 éves múltúra tekint vissza, de a biotechnológiájuk a 20. század közepétől fejlődött (CAI *et al.* 2021). A termesztés három fázisból áll: biomassa előállítása, betakarítás és feldolgozás. A biomassa előállítása során az elérhető legmagasabb fokon kell kielégíteni az algák környezeti igényeit. Ennek során az optimális tápelem, a pH hőmérséklet és fényellátottság elengedhetetlen (FEKETE 2016). Ezen feltételek biztosítása jelentős költséggel de alternatív megoldások, mint a szennyvíztisztítással kombinált tápanyagellátás vagy a és a bányászott, füstgázok CO₂-forrásként való használata csökkentheti a költségeket (FEKETE 2014). Az alga termesztési módszereknek alapvetően három nagy csoportját különböztethetjük meg:

- Természetes, helyszíni termesztés
- Nyílt medencés termesztés
- Zárt rendszerek

2.2.1 Természet-közeli termesztés, helyszíni betakarítás

A helyszíni betakarítás az algák eredeti élőhelyén történik, minimális beavatkozással. A rendszer tulajdonképpen az erdőgazdálkodáshoz hasonló módon működik, így az algák növekedéséhez nem kell különösebb energiát befektetni, csak a termőhelyet kell biztosítani (FEKETE 2016). Ez a módszer főleg makroalgákra jellemző. A fejlődő országokban még ma is elterjedt (5. ábra). Az algavirágzások kihasználása által biomassa nyerhető, miközben csökkenthetőek a káros hatások (BOROWITZKA 1999).



5. ábra: Kezdetleges technológiájú, sekély vízi vörös alga termesztés Zanzibár szigetén (CHAFFER 2018)

2.2.2 Nyílt medencés termesztés

A nyílt medencés elrendezés meglehetősen hasonlít a természetes algatermesztéshez, de ezek a kultúrák ember által épített olyan tartályokban vannak elhelyezve, ahol a tápanyagellátásról, a víz keringetéséről és a levegőztetésről kontrollált módon lehet gondoskodni. A legelterjedtebb típus a sekélyvízű (maximum 30 cm mély) medencés rendszer. Sok helyen alkalmazzák a szennyvíztisztításból ismert *Dorr*-típusú ülepitő medencéhez hasonló kör alaprajzú, központi tengelyű telepet, de a futópálya típusú elrendezés is igen gyakori, amelyben egy keverőlapát tartja mozgásban a vizet (6. ábra). Elterjedt még a gravitációs úton meanderező medencés rendszer is, melyben a víz egy lejtővel ellátott, labirintusszerű kádban mozog és amint eléri a lejtő alját, egy átemelő szivattyúval visszajuttatják annak tetejére (MÉSZÁROS és KÖLES 2013). Az ilyen rendszerek egyértelmű előnye alacsony beruházási költség és az egyszerű, alacsony költségű üzemeltetés. Ugyanakkor hátrányt jelent a hőmérséklet ingadozása, a nagy párolgási vízvesztés és a szennyeződésekkel szemben való nagymértékű kitettség, ami vírusok és

zooplankton fajok elszaporodásához vezethet, ráadásul ezekben a rendszerekben nem lehetséges egy adott algafaj monokultúrában való fenntartása (BOROWITZKA 1999).



6. ábra: Futópálya típusú nyílt medencés rendszer alkalmazása Kalifornia Államban (BOŠNJAKOVIĆ 2013)

2.2.3 Zárt rendszerű algatermesztés

Ha az algákat zárt edényzetű rendszerekben, ún. fotobioreaktorokban (photobioreactor - *PBR*) termesztjük, akkor a nyílt rendszerek legnagyobb hátrányait ki lehet küszöbölni. Ilyen a hőmérséklet szabályozása és a szennyeződések elleni védekezés. Ilyen rendszerekben akár egyetlen algafajnak a folyamatos fenntartása is lehetséges, anélkül, hogy másik algafaj vagy egyéb mikroorganizmus spórája bekerülne a rendszerbe. A zárt rendszer lehetővé teszi továbbá a vízvesztés ellen való védekezést és itt az esetlegesen felhasznált füstgázok CO_2 tartalma sem tud távozni, ezért jóval nagyobb a hasznosítási hatásfokuk (WANG *et al.* 2012). Azonban magasabb beruházási és fenntartási költségekkel jár, és az alga biofilm képződés rontja a hatékonyságot (FERNÁNDEZ *et al.* 2013). A NASA az Omega Projekt keretében tengerparti nagyvárosok szennyvizét használó lebegő fotobioreaktorokat tervez, amelyben az ott keletkező füstgázok is kézenfekvő módon hasznosulhatnak (NASA 2024). Az algabiomassza jelentős gazdasági értéket képvisel, így a *PBR*-ok kutatása folyamatosan fejlődik (ARAÚJO 2021).

1. táblázat: A nyílt és zárt algatermesztési rendszerek összehasonlítása (EGBO *et al.* 2018)

Szemponatok	Nyílt termesztés	Fotobioreaktorok
szennyeződés veszélye	nagyon magas	alacsony
helyigény	magas	alacsony
vízvesztés	nagyon magas	elhanyagolható
szén-dioxid veszteség	magas	elhanyagolható
az alga fertőzésekkel szembeni ellenállása	ellenálló	érzékeny
a termesztendő fajok száma	a felhasználhatóság csak néhány fajra korlátozott	sok, majdnem minden faj termesztendő így
a kihozatal rugalmassága	alig változtatható	nagymértékben változtatható
a termesztési paraméterek állíthatósága	nem állíthatóak, az időjárás szerint változnak	nagymértékben alakíthatóak
folyamatirányítás	nem megoldható	lehetséges
szabványosítás	nem lehetséges	lehetséges
időjárás függőség	erőteljes	kiküszöbölhető
a termésmaximum elérési ideje	6–8 hét	2–4 hét
maximális algasűrűség	0,1–0,2 g/L	2–8 g/L
a termesztés határfoka	alacsony határfok, lassú, kis koncentrációjú kimeneti anyag	magas határfokkal, nagy algasűrűségű kimeneti termék érhető el
a termelt alga minősége	változó	állandó, tiszta
energiaigény	alacsony	lehet igen magas is
beruházási költség	alacsony	magas
üzemeltetési költség	alacsony	magas

A főbb fotobioreaktor-típusok és jellemzőik:

- Sík paneles (7. ábra): Nagy fényhasznosítás, de könnyen túlmelegedik (WANG *et al.* 2012).
- Csöves (8. ábra): Kevés helyet foglal, de könnyen kialakul benne inhomogenitás, valamint a nagy belső felület a letapadó algáktól való megtisztítása nehézségekkel jár (FEKETE 2016). Lehet vízszintes, vagy függőkeges kialakítású.
- Zsákos: Az üveg vagy kemény műanyag falú kialakításnál jóval olcsóbb, de sérülékeny, tisztítása nehezebb (SINGH és SHARMA 2012).



7. ábra: A sík paneles fotobioreaktorok elrendezése (BWATANGLANG *et al.* 2015)



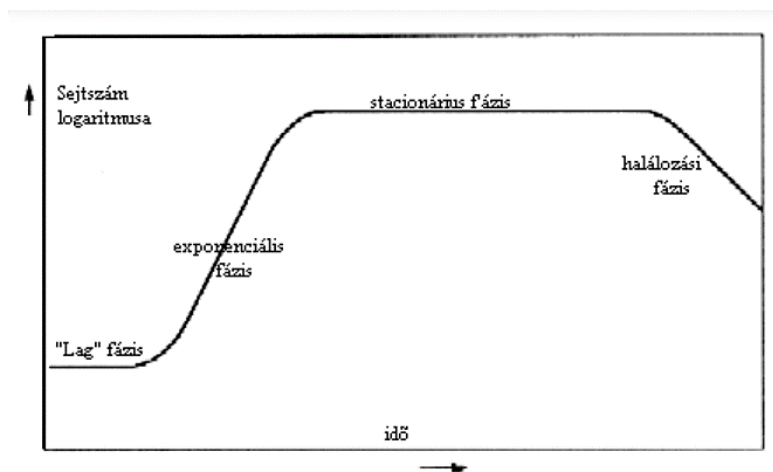
8. ábra: A fektetett csöves fotobioreaktorok elrendezése (RAUT *et al.* 2015)

2.3 Az algatermesztés követelményei

2.3.1 Az algafaj kiválasztása

A megfelelő algafaj kiválasztása kritikus fontosságú. A választás fő szempontjai közé tartozik a gyors növekedés és a célzott alkalmazáshoz szükséges optimális biokémiai összetétel. Az általam elvégzett kísérletekben is különösen fontos volt az olyan algák kiválasztása, amelyek a fenti tulajdonságok mellett extrém körülmények között is képesek növekedni. Az alkalmazott algáknak el kell viselniük a magas CO₂-koncentrációkat, akár a füstgáz közvetlen bevezetése révén is (GRIFFITHS és HARRISON 2009). A kiválasztás főbb szempontjait a 2. táblázat foglalja össze. Az általam kiválasztott algafaj a *Chlorella*

vulgaris volt, ami az egyik leggyakrabban használt faj a különböző tudományos kísérletekben (BECKER 1994). A *Chlorella* sikerének fő oka, hogy a laboratóriumi körülmények nagyon széles spektrumán hatékonyan termeszthető, flagellumok hiányában jól homogenizálható, szinte vegyületként kezelhető (NIELSEN és WILLEMOES 1966). Ezenkívül kiválóan tolerálja a magas, akár a 40%-ot is elérő CO₂-koncentrációkat (3. táblázat), emiatt széles körben alkalmazzák CO₂-megkötési kísérletekben (SIRIKULRAT és KOONAPHAPDEELERT 2013). A mikroalgák életciklusának megértése rendkívül fontos a biomassa termelés során (9. ábra), mivel ez alapján lehet meghatározni a betakarítás időpontját, továbbá így fogjuk tudni ellenőrizni, hogy az állomány egészségesen növekvő tendenciát követ-e az adott időpontban.



9. ábra: A mikroorganizmusokra jellemző növekedési fázisok (LAKATOS 1999)

Az mikroalgák (ahogy általánosságban a mikroorganizmusok) növekedése négy különálló fázisból áll:

1. lappangási vagy indukciós (lag) fázis:
 - A sejtsűrűség lassan növekszik.
 - A sejteknek időre van szükségük az alkalmazkodáshoz, ami a növekedés késlekedését okozza, miközben az enzimek és a sejtosztódást, valamint a szénmegkötést elősegítő metabolitok szintje növekszik.
2. exponenciális (log) fázis:
 - Jellemzője a sejtsűrűség logaritmikus növekedése.
3. stacionáris fázis:
 - A sejtsűrűség viszonylag állandó, mivel a növekedési ütem egyensúlyban van a halálzással.

4. elhalási vagy összeomlási fázis:

- A sejtsűrűség gyors csökkenése, amely végül a tenyészet összeomlásához vezet (FEKETE 2014).

2. táblázat: Az algák előnyös tulajdonságai a tömegtermesztés szempontjai alapján (GRIFFITHS és HARRISON 2009)

A tulajdonság megnevezése	A tulajdonsággal járó előnyök
gyors növekedési ütem	versenyelőny az azonos élettérért és erőforrásokért versengő fajokkal szemben, kisebb helyigény
magas terméktartalom	amennyiben az alga valamely komponense jól értékesíthető, úgy a biomassa magasabb árat képvisel, ha magasabb koncentrációban található benne az adott hatóanyag
növekedési képesség szélsőséges környezetben	csökkenti a szennyeződés és a ragadozás általi visszaesés mértékét a tenyészetben
nagy sejtméret, koloniális vagy fonalas morfológia	csökkenti a betakarítási és feldolgozási költségeket
széles körű tolerancia a környezeti feltételekkel szemben	kevésbé igényel energiaráfordítást a különböző évszakokban és környezeti időjárási körülmények között történő termesztés során a tenyészet optimális értékek között tartása
kiemelkedő CO ₂ -tolerancia és abszorpciós kapacitás	nagyobb potenciál a CO ₂ megkötésére és a hulladék CO ₂ felhasználására
nyíróerő túrése	olcsóbb szivattyúzási és keverési módszereket lehet alkalmazni
szennyezőanyag-tolerancia	tápanyagigény ellátás szennyvízzel és magas CO ₂ -, NO _x - és SO _x -tartalmú füstgázokkal
autoinhibitor mentesség	csökkenti a növekedés öngátló hatását nagy biomassa sűrűség esetén

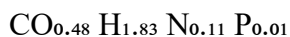
Az algakultúrák különféle okok miatt összeomolhatnak, például tápanyaghiány, túlmelegedés, pH-ingadozás vagy szennyeződés. A sikeres algatermesztés érdekében a kultúrákat az exponenciális növekedési fázisban kell tartani (LAVENS és SORGELLOOS 1996). A legmagasabb biomasszahozam elérése érdekében biztosítani kell a mikroalgák számára legmegfelelőbb termesztési feltételeket.

3. táblázat: Az egyes algafajok CO₂-toleranciája (SALIH 2011)

Algafaj	A levegőztetésre alkalmazott CO ₂ -szint imert maximuma
<i>Cyanidium caldarium</i>	100%
<i>Scenedesmus</i> sp.	80%
<i>Chlorococcum littorale</i>	60%
<i>Synechococcus elongatus</i>	60%
<i>Euglena gracilis</i>	45%
<i>Chlorella</i> sp.	40%
<i>Eudorina</i> spp.	20%
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15%
<i>Nannochloris</i> sp.	15%
<i>Chlamydomonas</i> sp.	15%
<i>Tetraselmis</i> sp.	14%

2.3.2 Tápközeg

A termesztés során a növekedési közegnek biztosítania kell az algasejtet alkotó szervetlen elemeket. A Dragone *et al.* (2010) által megadott mikroalga-biomassza közelítő molekuláris képlete alapján becsülhetők a minimális tápanyagigények:



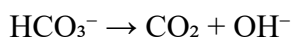
A nitrogént leggyakrabban nitrát (NO₃⁻) formájában biztosítják, de gyakran ammónium (NH₄⁺) is használatos. A legkedvezőbb nitrogénforrás azonban a karbamid, mivel magasabb hozamokat eredményez és kisebb pH-ingadozásokat okoz a közegben. Blair és munkatársainak (2014) nitrogén- és foszfor-koncentráció hatásaira vonatkozó tesztjei azt mutatták, hogy az alacsony nitrogénkoncentráció serkentheti az algák növekedését. Mivel nem minden hozzáadott tápanyag biológiailag hozzáférhető, bizonyos tápanyagokat, például a foszfort, jelentős többletben kell biztosítani. Az algák növekedése nemcsak a makrotápanyagok (pl. szén, nitrogén, foszfor, szilícium), hanem a fő ionok (pl. Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) és a mikrotápanyag-fémek (pl. vas, mangán, cink, kobalt, réz, molibdén) jelenlététől is függ (DRAGONE *et al.* 2010).

2.3.3 Szénforrás

A mikroalgák szénforrásuk alapján csoportosíthatók. Ha szervetlen vegyületeket használnak, akkor autotrófoknak nevezzük őket, míg a szerves szénvegyületeket felhasználókat heterotrófoknak hívjuk. Mindkét csoportban további két altípus különböztethető meg az anyagcseréhez használt energiaforrás szerint. Az energiaforrásként fényt használó algák a fototrófok, míg a molekulák oxidációját energiáért végzők a kemotrófok. Néhány mikroalga képes ötvözni a heterotrófiát és az autotrófiát, ezeket mixotrófnak nevezzük. Az autotróf algák a fotoszintézis révén alakítják át a napsugárzást és a kloroplasztiszok által megkötött CO₂-t adenozin-trifoszfáttá (ATP) és oxigénné (DRAGONE *et al.* 2010).

2.3.4 pH

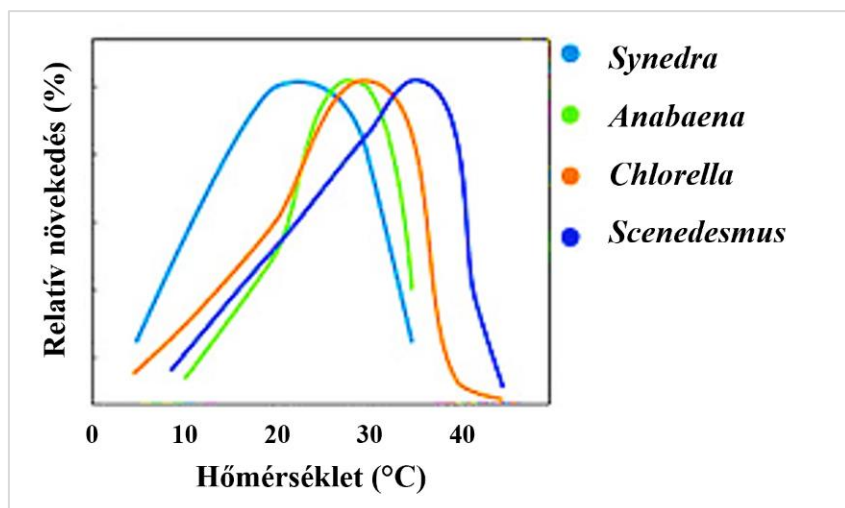
A legtöbb termesztett algafaj számára a tolerálható pH-tartomány 7 és 9 között van, az optimális érték pedig 8,2–8,7. Az alganövekedés során, a nagy sejtsűrűségű kultúrákban emelkedett pH-érték figyelhető meg, amely akár a 9-es határértéket is elérheti (LAVENS és SORGELOOS 1996). A közeg természetes pufferanyagait a bikarbonát- és karbonátionok alkotják (PREISIG és ANDERSEN 2005). Az Azov (1982) által leírtak szerint a bikarbonát algák általi felhasználása növeli a közeg pH-ját a következő reakció szerint:



A pH a legfőbb tényezője a vízben található szénrendszer fajlagos koncentrációinak, továbbá hatással van a szén elérhetőségére az algák fotoszintézise során az intenzív kultúrákban (AZOV 1982).

2.3.5 Hőmérséklet

A leggyakrabban termesztett mikroalgafajok a 16 és 27 °C közötti hőmérsékletet tolerálják, míg az optimális hőmérséklet általában 20 és 24 °C között van (10. ábra). Az alganövekedés lelassulhat, ha a hőmérséklet 16 °C alá csökken, míg számos faj számára halálos lehet, ha a hőmérséklet meghaladja a 35 °C-ot (LAVENS és SORGELOOS 1996).



10. ábra: Egyes mikroalgafajok növekedési optimuma a hőmérséklet függvényében (UKAPS 2025)

2.3.6 Fény

Fontos a megfelelő fényintenzitás beállítása az algatenyészet számára. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy a fényigény függ a sejt kultúra mélységétől és az algasejtek sűrűségétől. A túl magas fényintenzitás fotoinhibíciót vagy túlmelegedést okozhat (FEKETE 2014). Blair *et al.* (2014) kísérletei kimutatták, hogy hosszabb növekedési időszakokban a kék fény magasabb növekedési rátát és biomassza-termelékenységet eredményezhet, mint a tiszta, vörös vagy zöld fény hullámhosszai. Lavens és Sorgeloos (1996) javasolják a kultúrák mesterséges megvilágítását naponta legalább 18 órán keresztül. Bár a fajok egyedi igényeik miatt nagyon nehéz egységes optimumról beszélni, az esetek többségére jellemző kedvező algatermesztési feltételeket az 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat: A mikroalgák optimális termesztési feltételei (LAVENS és SORGeloos 1996)

Paraméter	Mértékegység	Tűrési tartomány	Optimum
hőmérséklet	°C	16–27	18–24
megvilágítás intenzitása	lux	1 000–10 000	2 500–5 000
megvilágítás időtartama	világos:sötét órák száma	16:8 (minimum) 24:0 (maximum)	-
pH	-	7–9	8,2–8,7

2.3.7 Keverés

A keverés három célja az algák üledékképződésének megakadályozása, annak biztosítása, hogy az egész populáció egyenlő mértékben jusson fényhez és tápanyagokhoz, valamint a gázcsere javítása a levegőből. Lavens és Sorgeloos (1996) szerint azonban nem minden algafaj tolerálja az erőteljes keverést. A gyakorlatban ezt a nyílt medencék esetében keverőlapátokkal, a PBR-ok esetében pedig az edényzet lejtőszögével, az átemelések közben történő felszívattyúzással és a beáramoltatott gáz buborékai által keltett örvények révén oldják meg.

2.3.8 Bio-inhibitorok

A kerekeshéjúak (*Rotatoria*), különösen a *Branchionus*-fajok, az algasejtek elszaporodását akadályozhatják. Becker (1994) szerint a tenyészetek pH 3-ra való savanyításával és a savanyú pH két órán keresztül történő fenntartásával ezek az inhibitorok eltávolíthatók. Két óra elteltével a pH visszaállítható az ideális, semleges közeli tartományba. A *Chlorella* és *Spirulina* tenyészetekben amőbák is előfordulhatnak, amelyek számát ammónia nitrogénforrásként történő alkalmazásával lehet csökkenteni (PREISIG és ANDERSEN 2005).

2.3.9 A termesztő edényzet kialakítása

Számos műszaki megoldás létezik az algatermesztő rendszer tartályainak kialakítására. Az ideális forma kiválasztása fontos kérdés lehet a kereskedelmi méretű algatavak esetében, mivel az egyes konfigurációk között jelentős különbségek lehetnek a termelési hatékonyság, a tőkeköltések és a karbantartási költségek tekintetében. A termesztő edényzet kialakítási lehetőségeit részletesen a 2.2. fejezetben lehet megtalálni.

2.4 A mikroalga betakarítási technikák

Ahhoz, hogy a termesztés során kinyert mikroalgákat megfelelően felhasználhassuk, először el kell választani őket a folyékony fázistól, majd a víztelenítésük szükséges. Az ipari alkalmazás lehetőségeit célzó kutatások szerint a mikroalga-biomassza előállítás költségeinek 20–30%-át a betakarítás költségei teszik ki (GALCSIK 2019), így kiemelten fontos a gazdaságosságot elősegítő betakarítási technika kiválasztása. A mikroalgák elválasztásakor alapvető tényező, hogy az egyes fajok eltérő méretűek, ami jelentősen

befolyásolja az alkalmazható eljárások hatékonyságát vagy használhatóságát. Emellett megfigyelték, hogy az eltérő fajok környezeti hatásokkal szembeni toleranciája is nagyban különbözik (ZHANG *et al.* 2014). Mindezeket figyelembe véve nemcsak a megfelelő szétválasztási technológia kiválasztása lényeges, hanem az is, hogy a termesztett mikroalga faj megfeleljen az alkalmazott eljárásoknak.

Mivel több tanulmány szerint is az elválasztási technológiák képezik napjainkban a legfőbb gátját annak, hogy a mikroalga technológiák tömeges alkalmazása széles körben elterjedhessen (DEEPA *et al.* 2023, DE MORAIS *et al.* 2023), ezért az alábbiakban röviden összefoglalom a jelenleg alkalmazott módszereket. Az összehasonlítás alapját Al hattab és munkatársainak (2015) alapos összefoglalója adja, amely munka kitér az egyes technológiák értékelésére is. Fontos megjegyezni, hogy míg ebben a munkában szerepelnek a vegyi anyagok használatával járó környezeti és egészségügyi kockázatok, nem tér ki az algabiomassza további felhasználhatóságára, amely a hozzáadott vegyi anyagok révén kifejezetten az alacsony piaci árat képviselő szektorokra korlátozódik (JAPAR 2017).

A mikroalga-termesztés során alkalmazott elválasztási technológiák főbb típusai:

Ülepítés (*sedimentation, S*)

Az ülepedés gravitációs elven alapul, ahol a mikroalgasejtek az idő előrehaladtával a reaktor aljára süllyednek. Ezt a módszert különösen nagy sűrűségű sejtek esetében alkalmazzák, de lassúsága miatt ipari alkalmazása korlátozott (AL HATTAB *et al.* 2015).

Vákuumos szűrés (*vacuum filtration, VF*)

A vákuumos szűrés során a mikroalgákat porózus szűrőközegek segítségével vonják ki, miközben vákuumot alkalmaznak a folyamat gyorsítására. A technika költséghatékony módon alkalmazható a kisebb léptékű alkalmazásokban, de nagy energiaigénye korlátozza ipari szinten történő elterjedését (VAN LAL CHHANDAMA *et al.* 2013).

Présszűrés (*pressure filtration, PF*)

A présszűrés esetében nyomás alkalmazásával szűrik ki a mikroalgákat, amely gyorsabbá és hatékonyabbá teszi a folyamatot, a vákuumos szűréshez képest. Különösen hasznos a nagy töménységű algatermesztés esetén (THEVARAJAH *et al.* 2011).

Keresztáramú szűrés (*cross flow filtration, CFF*)

A keresztáramú szűrés során a folyadék áramlása párhuzamos a szűrő membránnal, amely megakadályozza a membrán eltömődését. Ez a technika nagy hatékonyságú, de magas beruházási költségekkel jár (AL HATTAB *et al.* 2015).

Tányéros centrifugálás (*disc stack centrifugation, DSC*)

A tálcás (lemezverem) centrifugálás sűrűség alapján választja szét a mikroalgákat a folyadékfázistól. Nagy teljesítőképességgel rendelkező és széleskörűen alkalmazható technika, azonban igen energiaigényes (MOLINA-GRIMA *et al.* 2003).

Dekanteres centrifugálás (*decanter centrifugation, DC*)

A dekanteres centrifugálás egy folyamatos üzemű módszer, amely a mikroalgákat nagy hatékonysággal választja el. A módszer kiválóan alkalmas a különböző ipari alkalmazásokban történő felhasználásokra, bár az energiafelhasználás mérsékelt problémákat okozhat (VAN LAL CHHANDAMA *et al.* 2013).

Diszpergált levegő flotáció (*dispersed air flotation, DF*)

A diszpergált levegő flotáció során finom levegőbuborékokat használnak a mikroalgák felületre történő felhozatalához. A diszpergált levegő flotációs technika különösen hatékony a kis sűrűségű algatermesztés esetében (THEVARAJAH *et al.* 2011).

Oldott levegő flotáció (*dissolved air flotation, DAF*)

Az oldott levegő flotáció hasonló a diszpergált levegő flotációhoz, de magasabb nyomáson üzemel, ami finomabb buborékok képződését teszi lehetővé. A diszpergált levegő flotációja általában nagyobb, körülbelül 1 mm átmérőjű buborékokat, míg a DAF sokkal kisebb, 0,1 mm-es vagy kisebb buborékokat hoz létre. Ennek eredményeként nagyobb hatékonysággal vonható ki a biomassa (AL HATTAB *et al.* 2015).

Fluidikus oszcilláció (*fluidic oscillation, FO*)

A fluidikus oszcillációs módszer oszcilláló áramlást használ a sejtek szétválasztására. A fluidikus oszcillációs technika innovatív, de jelenleg kevésbé elterjedt, mivel további kutatások szükségesek a skálázhatóságának bizonyításához (VAN LAL CHHANDAMA *et al.* 2013).

Szervetlen flokkuláció (*inorganic flocculation, IF*)

A szervetlen flokkuláció során alumínium- vagy vas-sókat alkalmaznak a mikroalgák koagulálására. A szervetlen flokkulációs módszer olcsó és egyszerű, de toxikus vegyi anyagokat hagyhat maga után (MOLINA-GRIMA *et al.* 2003).

Szerves flokkuláció (*organic flocculation, OF*)

A szerves flokkuláció során szerves polimereket, mint például kitozánt, keményítőt, módosított tanninokat vagy poliakrilamidokat használnak a sejtek kicsapatására. A szerves flokkuláció kevésbé toxikus, mint a szervetlen flokkuláció, azonban jóval drágább. Mind a szerves, mind a szervetlen flokkulálók elválasztási hatékonysága nagymértékben függ fizikai-kémiai tulajdonságaiktól, mint az oldhatóság és elektronegativitás, valamint a működési feltételektől, például az adagolástól és az alga szuszpenzió jellemzőitől, például a sejtsűrűség, pH és ionerősség (THEVARAJAH *et al.* 2011).

Auto-flokkuláció (*auto-flocculation, AF*)

Az auto-flokkuláció során a mikroalgák maguktól aggregálódnak a környezeti feltételek (pl. pH változás) megváltozása következtében. Az auto-flokkulációs technika alacsony költségű, de kevésbé kontrollálható (VAN LAL CHHANDAMA *et al.* 2013).

Bio-flokkuláció (*bio-flocculation, BF*)

A bio-flokkuláció során mikrobiális organizmusokat alkalmaznak a mikroalgák aggregálására. A bio-flokkulációs technika környezetbarát, de komplexebb eljárásokat igényel (AL HATTAB *et al.* 2015).

Elektrolitikus koaguláció (*electrolytic coagulation, EC*)

Az elektrolitikus koaguláció során elektromos áramot használnak a mikroalgák aggregációjának kiváltására. A fém elektródák (pl. alumínium vagy vas) elektrolízise során fémionok (pl. Al^{3+} vagy $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) oldódnak ki a vízbe. Ezek az ionok hidrolizálnak és koaguláns anyagokat, például fém-hidroxidokat képeznek. A fém-hidroxid pelyhek megkötik a mikroalgákat, destabilizálják a szuszpenziót, és ülepetést idéznek elő. Az elektrolitikus koaguláció hatékony, de magas energiaigénye miatt kevésbé elterjedt (THEVARAJAH *et al.* 2011).

Elektrolitikus flokkuláció (*electrolytic flocculation, EFC*)

Az elektrolitikus flokkuláció kombinálja az elektrolitikus koaguláció és a flokkuláció előnyeit, elektromos áram segítségével gyorsítva a folyamatot.

A mikroalgák töltéssel rendelkező sejtfalai az elektromos tér hatására mozognak (elektroforézis). A negatív töltésű algasejtek az anódhoz vonzódnak, ahol elveszítik töltésüket és összetapadnak. Az így kialakult pelyhek könnyebben kiülednek vagy felúsznak a víz felszínére. Utóbbi két eljárás között tehát a fő különbség tehát, hogy az EC esetében plusz vegyi anyagok (fémionok) is bekerülnek a rendszerbe, míg az EF tisztán elektromos hatásokra épül. Az energiahatékonyság javításával ez a technika ígéretes lehet. (AL HATTAB *et al.* 2015).

Elektrolitikus flotáció (*electrolytic flotation, EFT*)

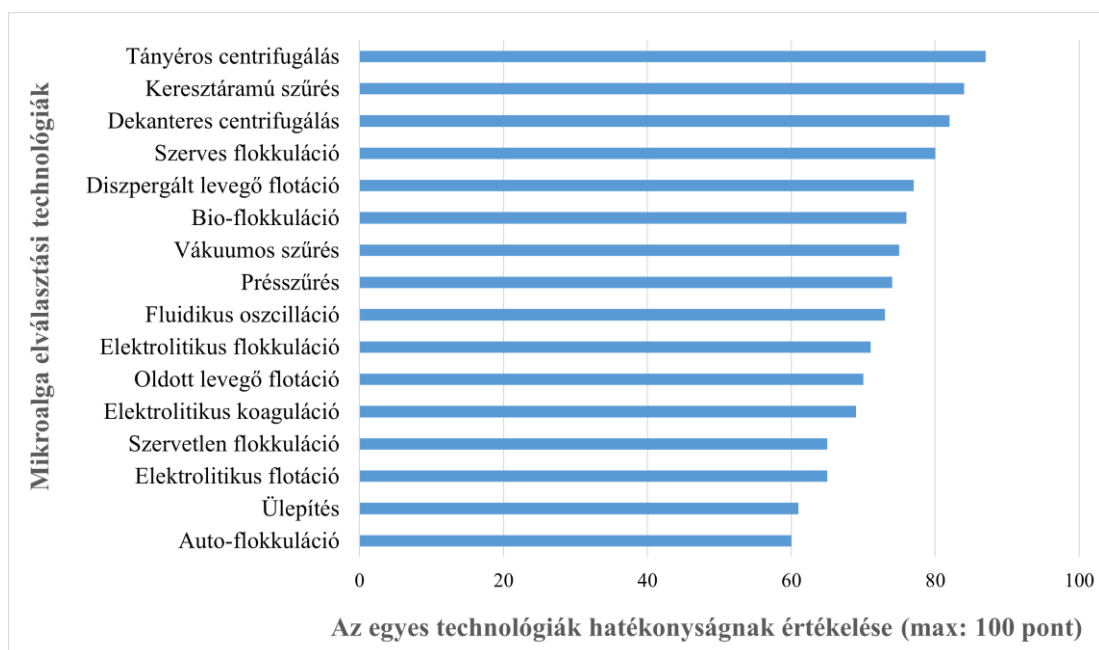
Az elektrolitikus flotáció során az elektrolízis során keletkező gázokat használják a mikroalgák felszínre emeléséhez. Az elektrolízis során az anódon oxigén (O_2), a katódon pedig hidrogén (H_2) gázbuborékok keletkeznek. Ezek az apró buborékok megtapadnak a mikroalgák felszínén, csökkentve azok sűrűségét. A buborékok felhajtóereje miatt az algák a vízfelszínre emelkednek, ahol könnyen eltávolíthatók. Összességében az elektrolitikus flotáció egy hatékony, vegyszermentes módszer, amely a mikroalgákat a vízfelszínre juttatja, így azok könnyen eltávolíthatók (VAN LAL CHHANDAMA *et al.* 2013).

A mikroalga elválasztási technológiákat Al hattab és munkatársai (2015) egy általuk felállított szempontrendszer alapján pontozták és értékelték (5. táblázat, 11. ábra). Az értékelés során a hatékony elválasztás mellett figyelembe vettek olyan szempontokat is, mint a folyamat időigénye, a beruházási és üzemeltetési idő, vagy a környezetre gyakorolt hatás.

5. táblázat: A mikroalga termesztés esetében alkalmazható elválasztási technológiák értékelése (AL HATTAB *et al.* 2015)

	Fizikai									Kémiai		Flokuláció		Elektroforézis		
	S	VF	PF	CFF	DSC	DC	DF	DAF	FO	IF	OF	AF	BF	EC	EFC	EFT
víztelenítési hatékonyság (15)	5	13	13	15	13	15	12	10	9	10	11	11	11	13	13	13
költség (15)	15	9	9	12	8	6	10	9	10	11	11	12	10	11	11	11
toxicitás, egészségügyi és környezeti hatás (15)	15	15	15	15	15	15	12	8	10	5	15	8	15	12	12	12
alkalmasság nagy méretekhez (15)	5	10	10	10	12	12	13	13	13	15	15	8	15	7	8	8
idő (15)	2	12	12	12	15	15	10	10	10	10	10	8	10	15	15	10
fajspecifikusság (10)	4	6	5	8	10	5	5	8	8	5	6	4	8	3	5	4
a közeg újra-felhasználhatósága (8)	8	8	8	8	8	8	8	5	6	2	5	2	3	5	4	4
karbantartás (7)	7	2	2	4	6	6	7	7	7	7	7	7	4	3	3	3
összpontszám (100)	61	75	74	84	87	82	77	70	73	65	80	60	76	69	71	65

A keresztáramú szűrés hatékonysága miatt kiemelkedik, ám költsége és sebessége kevésbé teszi versenyképessé. Ezzel szemben a tálcás centrifugálás, amely a legmagasabb pontszámot érte el összességében, az egyik leggyorsabb módszerként ismert, azonban jelentős költségekkel jár. Az üleptetés ugyan a legköltséghatékonyabb megoldásként tűnik ki, de rendkívül lassú és alacsony hatékonysága miatt szinte alkalmatlan nagy mennyiségű mikroalga kinyerésére (GALCSIK 2019).



11. ábra: A mikroalga elválasztási technológiák összesített pontszáma (AL HATTAB *et al.* 2015)

2.5 Az algabiomassza lehetséges felhasználási módjai

A különböző algafajok életciklusa rendkívül változatos, méretük pedig a mikroszkopikus fajoktól a gigantikus, akár 60–70 méter hosszú moszatokig terjedhet. Körülbelül 80%-uk egysejtű mikroalga, míg a fennmaradó 20% többsejtű makroalga. A makroalgák makroszkopikus szervezetek, amelyek mérete milliméterektől akár több tíz méter hosszúságig terjedhet. A makroalga-biomassza különféle célokra használható, mint például emberi táplálék (pl. kelp, nori, wakame, tengeri szőlő, gracilaria és kappaphycus), hidrokolloidok (pl. karragén, agar, alginát), kagyló- és állati takarmány, biotrágyák, kozmetikumok, gyógyszerészeti termékek, textilipari rostok és biocsomagolás. Napjainkban a mikroalgáknak számos kereskedelmi alkalmazása megfigyelhető. Élelmiszerek és állati takarmányok tápértékének növelésére használhatók kémiai összetételük miatt, továbbá kulcsszerepet játszanak az akvakultúrában, valamint kozmetikai termékek alapanyagaként is alkalmazhatók. Emellett értékes molekulák forrásai, például többszörösen telítetlen zsírsavak, amelyek csecsemőtápszerekhez és étrend-kiegészítőkhez adhatók, valamint természetes pigmentek, amelyek festékanyagként hasznosíthatók. A stabil izotópok a biokémiai anyagok szerkezeti meghatározásban, illetve metabolikus tanulmányokban játszanak fontos szerepet (FEKETE 2017). Az algabiomassza rendkívül sokoldalú felhasználási lehetőségeit a 6. táblázat foglalja össze a különböző iparágak vonatkozásában.

Jelen pillanatban az algatechnológiáknak több kritikus pontja is van gazdasági szempontból. Ezek adják a magyarázatot arra a kialakult helyzetre, hogy egyes iparágakban virágzik az alga felhasználása, míg máshol még nem indult be az üzemi termelés. Ilyen kritikus pont a zárt fotobioreaktorok esetében a hatalmas beruházási költség, amely miatt ezek nem tudnak minden esetben rentábilisen működni (BENEMANN et al. 1986). Míg az egyszerűbb, olcsóbb megoldást jelentő nyílt medencés termesztésnél nagy a szennyeződés veszélye és könnyen elszaporodhatnak az algákat elfogyasztó élőlények (DE LA NOUE és DE PAUW 1988). Ebben az esetben a monokultúra termelése eleve kizárt, így ezeket nehéz faj- és így előállítandó termék-specifikusan működtetni. Ráadásul mindkét esetben egyformán jelentkeznek még a betakarítási, utókezelési, illetve a feldolgozási költségek. Azt általánosan kijelenthetjük, hogy a mikroalgákat jó hatásfokkal jelenleg csak igen költséges módokon (pl. centrifugálás, mikroszűrés) lehetséges vízteleníteni (UDUMAN et al. 2010). A technológiák jó része száraz biomasszát igényel, amelyet további energiaráfordítással érhetünk csak el, így ezek a technológiák csakis akkor válnak gazdaságossá, ha az előállított

termék árából fedezni tudjuk a felmerülő költségeket. Az alga energetikai hasznosítása ezért sem tudott elterjedni.

6. táblázat: Az algabiomassza lehetséges felhasználási területeinek áttekintése (FEKETE 2017)

Felhasználási terület	Felhasználás célja
élelmiszer előállítás	fehérjeforrás, alultáplált személyek számára speciális diéta
takarmány előállítás	fehérje- és vitaminforrás szárnyasok, szarvasmarha, sertés és halak számára
táplálék-kiegészítők előállítása	elsősorban por formában hagyományos ételek receptjeiben is alkalmazható
gyógykezelés	a β -karotin feltételezett gyógyhatással rendelkezik bőrdaganatok esetében, algából előállított antibiotikumok sebfertőtlenítésre, prosztaglandin-stimuláció algából izolált gamma-linolénsavval, koleszterol szintézis szabályozása
pigmentek felhasználása	β -karotin ételszínező
finomvegyipari felhasználás	glicerin használata ételekben, üdítőkben, kozmetikumokban és gyógyhatású készítményekben, zsírsavak, lipidek, viaszok, szterolok, aminosavak, enzimek, vitaminok előállítása, poliszacharidok felhasználása zselésítőként vagy viszkozitás növelőként
üzemanyag előállítás	tüzelőolaj (a hosszúlánцу szénhidrogénekből és észterezett lipidekből), biohidrogén és biogáz előállítás
hormonok	auxinok, gibberellinsav, citokin
egyéb	talajjavító, biotrágya, növényvédőszer, alkalmazás szennyvíz tisztítási technológiákban

Az algasejtek tápanyagellátása szintén jelentős költségként realizálódik a gyártás során, mivel hasonló igényeket kell kielégíteni (elsősorban nitrogénre és foszforra van szükség), mint a szárazföldi növények esetében (YANG *et al.* 2011). A folyamat gazdaságossá tételére azonban vannak igen ígéretes alternatívák, amelyekkel ki lehetne váltani a tápanyagok hozzáadását. A nitrogén és foszfor kiváltására már régóta folynak kísérletek az algasejtek szennyvíztisztító telepeken történő alkalmazása során, ahol a vízben oldott szennyeződések eltávolításával egyidejűleg lehetne megoldani az algák tápanyagellátását (OSWALD 1980). A nagy sűrűségű algatermesztés során az állomány szénigénye hozzáadott szénformákkal (pl. tisztított CO_2 gáz, NaHCO_3) is kiváltható lenne, ha a közegbe a füstgázokból leválasztott CO_2 -t adagolnánk, ami nem csak egy olcsó alternatív szénforrás lehetne, de elterjedése által jelentősen csökkenthetnénk a mesterséges CO_2 kibocsátást is (WANG *et al.* 2008; HO *et al.* 2011). Az algabiomassza lehetséges felhasználási módjait iparágak szerint a 4. számú mellékletben (M4) fejtem ki.

2.6 Az algamérési technikák kihívásai

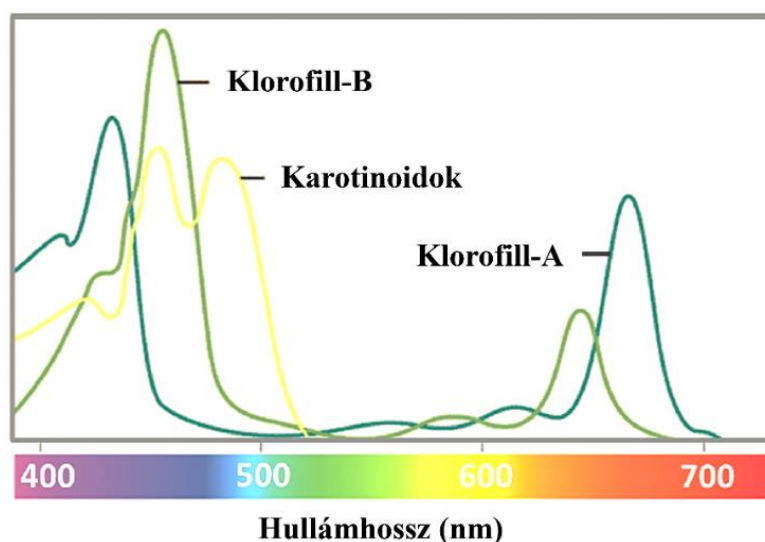
A tápanyagkezelés optimalizálása, az értékes komponensek potenciális termelésének becslése, valamint a *C. vulgaris* növekedésének és termelékenységének értékelése érdekében elengedhetetlen az algabiomassza meghatározása (HUESEMANN *et al.* 2013). A mikroalga-biomassza pontos felmérése szintén kulcsfontosságú a *C. vulgaris* hatékonyságának és fenntarthatóságának jellemzéséhez a szennyvízkezelési technológiákban való alkalmazása során. Az algabiomassza meghatározása mellett a klorofill-a-tartalom mérése is hasznos a *C. vulgaris* technológiai hatékonyságának és termelékenységének értékelésekor (ROSKO és RACHLIN. 1977). Az algabiomassza és az algasejtek klorofill-a koncentrációja különféle technikákkal, így többek között turbidimetriával (FERRANDO *et al.* 2015, FLORES *et al.* 2020, SCHAGERL *et al.* 2022), spektrofotometriával (GRIFFITHS *et al.* 2011, RIBEIRO RODRIGUES *et al.* 2011, SANTOS-BALLARDO *et al.* 2015), fluoreszcencián alapuló módszerekkel (MAYER *et al.* 1997, CADONDON *et al.* 2022) és lézeralapú analitikai módszerekkel (POŘÍZKA *et al.* 2014) mérhető. A különböző mérési módszerek kihívásait már az is jól reprezentálja, hogy már egy féle tiszta pigment mérése is igen komplex feladat. Seely és Jensen (1965) 40 különböző kivonattal készítette el a klorofill-a pigment spektrumát és mindegyik más és más spektrumot eredményezett az UV-VIS tartományban az elnyelés és a fluoreszcenciás emisszió mérése során is. A klorofill-a pigment különböző oldószerrel elkészített oldatainak esetében felvett spektrumok két csúcspontjához tartozó hullámhosszakot a 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: A klorofill-a pigment UV-VIS elnyelési csúcsai különböző oldószerrel történő előkészítést követően

Alkalmazott oldószer	Csúcs 1 (nm)	Csúcs 2 (nm)	Szerző
dietil-éter	430	662	AFZAL <i>et al.</i> 2004
etanol	440	670	USTIN <i>et al.</i> 2009
metanol	417	660	PRAHL 2017
aceton (90%)	430	664	LARKUM 2003
dimetil-sulfoxid	433	666	THERMOFISHER 2018

Ha az *in vivo* méréseket pontosan reprodukálni tudnánk egy olyan oldószerrel, amely az élő algáéval megegyező elnyelési csúcsokat eredményez, akkor a klorofill-a mellett más pigmentek fényelnyelését is figyelembe kellene venni, amelyek a *Chlorella*-sejtekben jelen

vannak (pl. klorofill-b, karotinoidok, 12. ábra) (GUIDI *et al.* 2017). Ráadásul ismert az a jelenség is, hogy a *C. vulgaris* termesztési körülményei különböző sejtméretet, sejtfalvastagságot, szintesteket, morfológiát és beltartalmi összetételt eredményezhetnek (KISS 2024). Az ismert eltérések fényében a radiometrián alapuló mérések sok hibalehetőséget tartogatnak magukban, továbbá számos kutatásra van még szükség a mérési modellek pontosításához.



12. ábra: A klorofill-a, -b és a karotinoidok abszorbancia spektruma (GUIDI 2017)

A fitoplankton-biomassza kvalitatív és kvantitatív meghatározása általában időigényes módszerekkel, többek között a sejtek közvetlen mikroszkóp alatt történő megszámlálásával, valamint a sejttömeg és a sejttérfogat mérésével végzik el. A spektrofotometriás és képfeldolgozáson alapuló módszerek pontos és nem túl időigényes megoldásokat kínálnak az algabiomassza meghatározására. Az UV-VIS spektroszkópiai módszerek esetében a tanulmányok többsége egy egyenes arányú összefüggést, lineáris matematikai modellt alkalmaz a *C. vulgaris* biomasszájának meghatározása során. A *C. vulgaris* algabiomassza becslésére szolgáló spektroszkópiai módszerek alkalmazása során ajánlott hullámhosszakat a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat: A *Chlorella vulgaris* biomassza becslésére szolgáló spektroszkópiai módszerek során alkalmazott mérési hullámhosszok, valamint az optikai sűrűség és az algasűrűség között megfigyelt lineáris korrelációk mértéke (saját szerkesztés)

Javasolt mérési hullámhosszok	R ²	Szerző
435	0,980	LIANG <i>et al.</i> , 2014
440	0,998	LOPES <i>et al.</i> 2020
450	n.a.	FAN <i>et al.</i> , 2008
600	n.a.	FERNÁNDEZ-LINARES <i>et al.</i> 2017
670	n.a.	KAINER 2018
680	n.a.	YATIRAJULA <i>et al.</i> , 2019
680 és 750	n.a.	GRIFFITHS <i>et al.</i> 2011
682	n.a.	BOCSI 2016
695	0,970	ALMOMANI és ÖRMECI 2018

Griffiths és munkatársai szerint a szakirodalomban nincs egyetértés a mikroalgák termesztéséhez szükséges optimális hullámhosszt illetően (GRIFFITHS *et al.* 2011). A pigmentek bizonyos spektrumtartományokban intenzívebben nyelik el a fényt. A pigment abszorbancia csúcérték-tartományában kiválasztott hullámhossz erősebb jelet adhat, ugyanakkor nagyobb hibát is eredményezhet, ha a sejtek pigmenttartalma változik. Ennek ellenére elterjedt a klorofill-a maximális abszorpciós tartományán belüli hullámhosszak használata (400–460 nm és 650–680 nm). Egy másik tanulmány kiemeli, hogy az optimális hullámhosszt nagymértékben befolyásolja a sejt méret és a klorofilltartalom, amelyek szintén függenek a sejt és a tenyészet korától (SMITH 2022).

A mikroalgák bioreaktorokban történő növekedésének nyomonkövetése azonban nem problémamentes. A fitoplankton vertikális és horizontális eloszlását számos tényező befolyásolja, beleértve a víz hőmérsékletét, a víz alatti fényviszonyokat, az UV-sugárzást és az elérhető tápanyagok mennyiségét (GRÓSZ *et al.* 2019, SAKHAROVA *et al.* 2020, KANG *et al.* 2021, LU *et al.* 2023). Az optimális mikroalga-termesztés és biomassza-termelés bioreaktor rendszerekben történő megvalósításában számos tényező, úgy, mint a kontrollált körülmények (pl. hőmérséklet, pH és tápanyagszintek), a megfelelő fényhullámhosszok a különböző mélységekben, valamint az egyes algasejtek közötti átfedések minimalizálása kulcsfontosságú szerepet játszik (CARVALHO *et al.* 2011, HUESEMANN *et al.* 2013, BLANKEN *et al.* 2016, METSOVITI *et al.* 2019, SARKER és KAPARAJU 2023). A mikroalgák növekedésének értékelése számos kihívással jár a sejtszámlálási és különböző szárítási lépések során, mivel ezek a folyamatok különleges

laboratóriumi követelményeket igényelnek, időigényesek, és fennáll a minta károsodásának lehetősége is (HAVLIK *et al.* 2013). A biológiai modellek előrejelezhetik az algák növekedésének összetett, nemlineáris dinamikus viselkedését (BERNARD és GOUZÉ 1999). Az első biológiai modellek fejlesztése óta javult a modellek robusztussága és érzékenysége a paraméterek bizonytalanságaival szemben, azáltal, hogy az algák növekedésének modell dinamikáját kísérleti adatokkal hasonlították össze (BERNARD és GOUZÉ 1999). A mikroalgák növekedésének modellezése azonban nem egyszerű a folyamatos (perzisztens) időben változókéony viselkedés és a komplex visszacsatolási rendszerek miatt, amely a fénycsillapítás révén a populációs szinttől a sejtek szintjéig megvalósul (BERNARD 2011).

2.7 Az alga szén-megkötési technológiák

2.7.1 Szén-dioxid megkötési és tárolási (CCS) technológiák

A CO₂ megkötési és tárolási technológiák („*carbon capture and storage techniques*”, CCS) a globális éghajlatváltozás elleni küzdelem kulcsfontosságú elemei. A CCS-technológiák lehetővé teszik az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentését anélkül, hogy teljesen lemondanánk a fosszilis tüzelőanyagok használatáról. A CCS-rendszerek három fő lépésből állnak. Az első lépés a CO₂ megkötése, amelynek során a CO₂-t a kibocsátási forrásokból, például szénérőművekből, cementgyárakból vagy acélművekből választják ki. A megkötés technológiái közé tartozik a poszt-kompressziós (utólagos), az elő-kompressziós és az oxigénes tüzelési (*oxyfuel*) technológia (RUBIN *et al.* 2015). A második lépés a szállítás, amelynek során a megkötött CO₂-t nagy nyomás alatt csővezetékeken vagy hajókon keresztül szállítják a tárolási helyekre. A szállítási infrastruktúra fejlesztése kulcsfontosságú tényező a CCS-rendszerek megvalósíthatóságában (IEAGHG 2020). A harmadik lépés a tárolás, amelynek során a CO₂-t föld alatti geológiai formációkban, például kimerült olaj- és gázmezőkben, mély sósvizes rétegekben vagy bazaltformációkban helyezik el. Az ilyen tárolók biztonságos zárása és hosszú távú stabilitása alapvető fontosságú a szivárgások elkerülésének érdekében (BENSON és COLE 2008).

A CCS-technológiák számos ipari ágazatban alkalmazhatók, különösen ott, ahol a kibocsátások csökkentése más módszerekkel nehezen megvalósítható. Az energiaiparban például a szénérőművek és gázalapú erőművek továbbra is jelentős CO₂-források. A CCS-

technológiák alkalmazása az energiatermelésben akár 90%-kal lecsökkentheti a kibocsátásokat (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2021b). Az ipari folyamatok, például a cement- és acélgártás szintén jelentős kibocsátók, ahol a CCS az egyik leghatékonyabb kibocsátás-csökkentési technológia (ZAKKOUR és COOK 2010). A bioenergia és a CCS kombinálásával negatív kibocsátás is elérhető, mivel a biomassa növekedése során megkötött CO₂ tartósan tárolható (POPPER és TUOHY 2010).

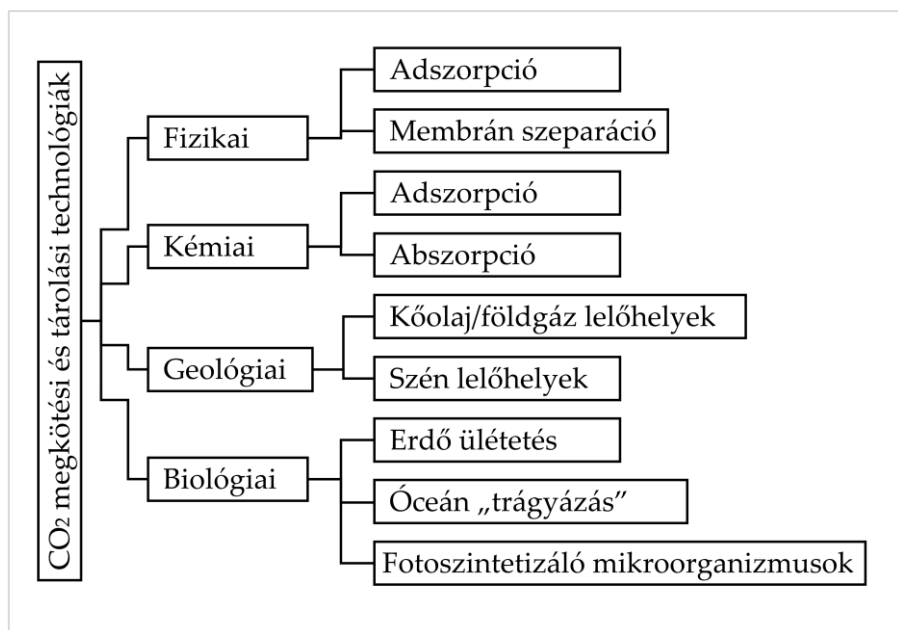
A CCS-rendszerek alkalmazása számos előnnyel járhat. Hatékonyan csökkenthetik az üvegházhatású gázok kibocsátását, különösen olyan iparágakban, ahol a megújuló energiaforrások nem alkalmazhatók közvetlenül. Emellett hozzájárulnak az energiabiztonsághoz, mivel lehetővé teszik a fosszilis tüzelőanyagok további használatát a klímaváltozás kockázatainak csökkentése mellett. A CCS-rendszerek technológiai rugalmassága révén különböző ipari és energia-előállítási folyamatokhoz igazíthatók (WALLQUIST *et al.* 2010). Ugyanakkor a CCS-technológiák alkalmazása során számos kihívással is szembesülhetünk. Az alkalmazás egyik legnagyobb akadályát a magas költségek jelentik, mivel a CCS-rendszerek telepítése és üzemeltetése jelentős beruházást igényel. Egy tonna CO₂ megkötésének költsége jelenleg 50–100 USD között mozog (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2021b). További kihívást jelent a megfelelő geológiai tárolók elérhetősége, amely regionálisan korlátozott lehet, valamint a tárolók szivárgásának kockázata és a helyi közösségek ellenállása, amelyek hátráltathatják a CCS-projektek megvalósítását (HASZELDINE 2009). A CCS-technológiák széles körű alkalmazásának kulcsa a költségek csökkentése és a technológiai innováció. A kormányzati támogatások, például adókedvezmények és beruházási ösztönzők, valamint a nemzetközi együttműködések szintén elősegíthetik a CCS-rendszerek elterjedését (GLOBAL CCS INSTITUTE 2021).

A szén-dioxid megkötési és tárolási (CCS) technológiák csoportosítása

A közvetlen megkötés során a CO₂-t a kibocsátási forrásnál fogják fel, míg a közvetett megkötés a már a légkörben lévő CO₂ eltávolítását célozza, gyakran CO₂-t elnyelő növények vagy talajrögzítés alkalmazásával (SHAKOOR *et al.* 2021). A CCS-technológiák működési elvük alapján csoportosíthatók (13. ábra). A CO₂ eltávolítása a füstgázokból fizikai módszerekkel adszorpció, vagy membrán szeparáció útján lehetséges (ZIELIŃSKI *et al.* 2023). A CO₂ fizikai megkötése során kriogén eljárásokat alkalmaznak, amelyek során a CO₂-t alacsony hőmérsékleten folyadékká alakítják, ami különösen hasznos lehet olyan ipari létesítményeknél, ahol nagy tisztaságú CO₂-t kell kezelni (AARON és TSOURIS 2005). A

kémiai abszorpció során amin-alapú oldatokat (pl. monoetanol-amin) használnak a CO₂ megkötésére. Ez a módszer széles körben elterjedt az iparban a poszt-kompressziós CCS-rendszerekben (DUTCHER *et al.* 2015). Az abszorpció magas energiaigénye miatt a szilárd adszorbensek előnyben részesített technológiát jelentenek a CO₂ megkötésére (STEELE 1993, ABD *et al.* 2020). Ugyanakkor a magas költségek, az anyagok elérhetősége és a technológiai kihívások korlátozzák szélesebb körű alkalmazását. A geológiai tárolás során a CO₂-t mély, föld alatti rétegekbe injektálják, ahol hosszú távon stabil marad. Alkalmas tárolóhelyek lehetnek például a kimerült olaj- és gázmezők, ahol az injektált CO₂ elősegítheti az olaj kitermelésének növelését („*enhanced oil recovery*”) (BENSON és COLE 2008). A geológiai tárolás az egyik legjobban kutatott módszer, mivel nagy mennyiségű CO₂ tárolását teszi lehetővé mély, olyan áteresztő formációkban, amelyeket áthatolhatatlan rétegek, például víztározók, olaj- és gázmezők vagy szénrétegek zárnak le (DEPAOLO ÉS COLE 2013, ZHANG *et al.* 2014, MIDDLETON *et al.* 2020, FAGORITE *et al.* 2023).

Bár a fotoszintézis hozzájárul a CO₂ megkötéséhez, a biomassa felhasználását általában inkább kibocsátás csökkentésnek, mint megkötésnek tekintik (IPCC 2005, WOODS 2008). A biológiai megkötés megvalósítható többek között természetes nyelők erősítésével, erdősítéssel, óceáni trágyázással és mikroalgák termesztésével is (SINGH és AHLUWALIA 2013, GOLI *et al.* 2016, GUDURU *et al.* 2022). A biológiai megközelítések közé tartozik a növények és algák alkalmazása a CO₂ megkötésére. Az algák különösen hatékonyak, mivel gyors növekedésük és magas fotoszintetikus aktivitásuk révén nagy mennyiségű CO₂-t képesek megkötni. Az algákból bioüzemanyag vagy más termékek is előállíthatók, ami további gazdasági előnyt jelenthet (LI és YAO 2024).



13. ábra: A szén-dioxid megkötési és tárolási (CCS) technológiák csoportosítása (ZHOU *et al.* 2017, ZIELIŃSKI *et al.* 2023)

Magyarország szén-dioxid megkötési és tárolási (CCS) potenciálja

A CO₂ hosszú távú, több évtizedig vagy ennél hosszabb ideig tartó felszín alatti, geológiai tárolására négy megoldás létezik, amelyek a következők: sósvízes tárolók, kimerített gázmezők és olajmezők, valamint a kitermelhetetlen széntelepek. Magyarországon mindegyik tárolási megoldás potenciálisan alkalmazható (HARTAI 2012). A nagyobb hazai cégek, olajvállalatok már régebben foglalkoznak a CO₂ kibocsátás csökkentésével, illetve a CO₂ elhelyezés felszíni technológiáinak vizsgálatával. Azonban annak környezetre gyakorolt hatásaival kapcsolatban nincsenek értékelhető eredmények, így Magyarország fenntartásokat fogalmaz meg a teljes technológiai folyamattal szemben. Ugyanakkor Magyarország kedvező adottságú a CO₂ földalatti elhelyezésének szempontjából (HODAI 2015). A hazánkban deponálható CO₂ mennyiségeket az 9. táblázat mutatja be.

9. táblázat: A Magyarországon deponálható szén-dioxid (CO₂) mennyiségek (HODAI 2015)

Tároló típusa	CO ₂ kapacitás (10 ⁶ t)
Mély sósvízes formációk	25 000
Szenes rétegek	717
Szénhidrogén mezők	469

Egy hazai felmérés során 180 olaj- és gázmezőt vizsgáltak meg, amiből 23–26-ot találtak technológiailag és gazdaságilag alkalmasnak CO₂-tárolásra. Legnagyobb kihívásként a CO₂-szivárgást nevezték meg, amit a geológiai tárolók alapos felderítésével és kiválasztásával, a CO₂-szivárgásnak ellenálló új kutak fúrásával, valamint monitorozással lehet kiküszöbölni. A vizsgált geológiai tárolók 150 millió tonna CO₂ raktározására alkalmasak, míg a befogadóképességüket tekintve a legjelentősebb tárolók az Alföldön, a kisújszállási szénhidrogénmezőben vannak. A becslések szerint az újfalui és szolnoki egységek sósvizes formációiban együttesen 2510 millió tonnányi CO₂-t lehetne elhelyezni (TÓTH 2023). Bár a két forrás adatai között van egy nagyságrend különbség, összevetésképpen a hazai összes bruttó CO₂ kibocsátás a 2022-es évben 45 millió tonna volt (KSH 2025), így még az óvatosabb, 2510 millió tonnás becslés szerinti is képesek lennének ennek az éves mennyiségnek az 55-szörösét eltárolni. A fent ismertetett technológiák közül a disszertációm további részeiben a biológiai, azon belül is az algákra alapozott szén-megkötési és tárolási módszerekre fókuszálok. Kutatásom fő célkitűzése, hogy új ismereteket adva hozzájáruljon ezek elterjedéséhez. Az alga CCS-technológiákról bővebben a 2.7.1. fejezetben lehet olvasni.

2.7.2 A szén-dioxid elnyelése hamu kivonatokban

Az elmúlt években megjelent „Európai Zöld Megállapodás” és az „Európai Klímátörvény” alapján kiemelt figyelmet kapott a megújuló energiaforrások előállítása és hasznosítása (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL 2021, RIVAS *et al.* 2021, TUTAK *et al.* 2021, ZLATEVA *et al.* 2024). Különösen figyelemre méltó, hogy az EU-ban a bioenergia továbbra is a domináns megújuló energiaforrások közé tartozik, annak ellenére, hogy az elmúlt évtizedben jelentős növekedés történt a szél- és napenergia területein. Az energiatermelési célú biomassa az EU megújuló energiaforrásainak közel 60%-át teszi ki. 2017-ben az energiatermeléshez felhasznált biomassa 69%-át erdei biomassa biztosította (ALI *et al.* 2022, KOŽUCH *et al.* 2023). Globális becslések szerint évente 900–1000 millió tonna energetikai hulladék keletkezik, amelyből 476 millió tonna biomassa-égetésből származó hamu. Az EU-ban ez az érték évente eléri a 100 millió tonnát, ezért ésszerűnek tűnik a biomassa-égetésből származó hamu különböző alkalmazásokban történő újrafelhasználása, például a mezőgazdaságban, a leromlott területek helyreállításában, a környezetvédelemben, a zeolit szintézisben, a ritkaföldfémek visszanyerésében, illetve a műanyaggyártásban (ODZIJEWICZ *et al.* 2022).

A cementipari porképződés (CKD) hasznosítása a CO₂ megkötési technológiákban régóta számos kutatás tárgyát képezi (HUNTZINGER *et al.* 2009, LI *et al.* 2024, ULIASZ-BOCHENŹCYK és DEJA 2024), mivel a cementipar jelentős mértékben hozzájárul a globális CO₂-kibocsátáshoz. Ugyanakkor a CKD minősége jelentős mértékben függ a felhasznált tüzelőanyag minőségétől. A faalapú biomassza hamu (*wood biomass ash*, WBA) alkalmazása kedvező alternatívának bizonyult, mivel az összetétele minőségileg pontosabban meghatározható (KOCH *et al.* 2021). Az ipari melléktermékként keletkező WBA értékes műtrágyakomponensként szolgál, ugyanis alapvető tápanyagokban (pl. kalcium, kálium és mikroelemek) igen gazdag. Ugyanakkor tartalmazhat környezeti szempontból káros anyagokat is, beleértve a nehézfémeket és az égésből származó szennyező anyagokat (pl. policiklusos aromás szénhidrogének és illékony szerves vegyületeket) (ODZIJEWICZ *et al.* 2022, ADAMCZYK *et al.* 2024).

2.7.3 A mikroalga és a hamu kivonat integrált alkalmazása CO₂ megkötésre

Az algaközösségek alkotják az édesvízi ökoszisztémák elsődleges termelő szintjét és az algák teszik ki a biomassza jelentős részét, valamint fontos szerepet játszanak a szénkörforgásban és az oxigéntermelésben. Ezen túlmenően az édesvízi táplálékhálók és a tápanyagszállítási folyamatok elengedhetetlen elemei (GOLDMAN *et al.* 1972, BROWN és ZEILER 1993). Gyors növekedésüknek és a vízminőség változásaira való érzékenységüknek köszönhetően a különböző algafajokat gyakran alkalmazzák tesztorganizmusként az ökotoxikológiai tesztek során, hogy felmérjék a vízszennyező anyagokból eredő lehetséges környezeti kockázatokat. Az algák felszíni vizekben betöltött fontos szerepükön túl, az algaközösségek kiemelt jelentőségük a vízkészletek fenntartható kezelésében is, valamint jelentős mértékben hozzájárulnak a megfelelő vízminőség fenntartásához, illetve eléréséhez. Természetes biofilterekként az algák képesek a tápanyagok és bizonyos vízszennyező anyagok (pl. fenolok, növényvédőszer-hatóanyagok és szénhidrogének) megkötésére, eltávolítására és felhalmozására (akkumulációjára), ezért az algafajok fenntartható megközelítést kínálnak a vízszennyezések kezeléshez. Ugyanakkor bizonyos algafajok tömeges elszaporodása a felszíni vizek eutrofizációjához vezethet, amely a vízminőség romlását eredményezi. Az algák szerepe a víz és energia kapcsolatrendszerében egyre inkább felismerésre kerül, mivel megújuló erőforrást jelentenek a bioüzemanyaggyártásban. Az algák fontos szerepet játszanak a CO₂ megkötésében, mivel elnyelik a légköri CO₂-t, majd beépítik azt a biomasszájukba (CHUNZHUK *et al.* 2023). A mikroalgákra

alapozott CO₂ megkötési és CCS-technológiák így hozzájárulhatnak az éghajlatváltozás mérsékléséhez.

A mikroalgákra alapozott CCS-technológia ígéretes megoldás, mivel a becslések szerint a mikroalgák termelik meg az atmoszférikus oxigén mintegy felét, miközben a fotoszintetikus aktivitásuk során CO₂-t használnak fel (TABATABAEI *et al.* 2011). A mikroalgákra épülő CCS-stratégiák számos előnyt kínálnak. A mikroalgák gyorsabban növekednek és hatékonyabban kötik meg a CO₂-t, mint a szárazföldi növények, majd a fotoszintézis révén teljes mértékben újrahasznosítják a CO₂-t, kémiai energiává alakítva azt (BONENFANT *et al.* 2003, DEMIRBAS 2004). A mikroalga-biomasszából történő energiatermelés biokémiai, termokémiai, kémiai és közvetlen égési folyamatokon keresztül számos végterméket eredményez (pl. fermentációból származó bioetanol, anaerob emésztésből származó biometán, elgázosításból származó szintézisgáz, biodízel, bioolaj és faszén pirolízisből) (WANG *et al.* 2008, FEKETE 2017). Számos tanulmány, különösen a biodízel előállítására irányuló kutatások, a költséghatékony, nagyléptékű gyártási módszerek fejlesztésére összpontosítottak, amelyek versenyképesek lehetnek a kőolajalapú üzemanyagokkal szemben. Bár az algákból származó harmadik generációs üzemanyagok jelentős előnyökkel rendelkeznek a hagyományos növényi alapú üzemanyagokkal szemben, a biomassa energia nem tekinthető szénmegkötési technológiának, mivel a CO₂ visszajut a légkörbe az égetés során (DRAGONE *et al.* 2010).

A mikroalgák fenntartható takarmány-alternatívát kínálnak az állatok számára. Emellett az algák segítenek egyensúlyba hozni az élelmiszer-, takarmány- és bioüzemanyagszükségleteket, miközben csökkentik a kedvezőtlen környezeti hatásokat (MADEIRA *et al.* 2017). A biotechnológiai fejlődés optimalizálta a mikroalga-örműket, hogy hatékonyan termeljenek tápanyagokat és kössék meg a CO₂-t, ezzel erősítve „sejtgyárakként” funkcionáló szerepüket (AHMAD *et al.* 2022). Ugyanakkor további kutatások szükségesek a kockázatértékelés terén, annak érdekében, hogy biztonságosan lehessen hasznosítani az ipari füstgázokból származó mikroalga-biomasszákat (FARRELLY *et al.* 2013). Habár a mikroalgák üzemanyagként vagy takarmányként való alkalmazása során az algasejtek által megkötött CO₂ végül visszakerül a légkörbe, a mikroalgákra alapozott vegyipari termelés hozzájárulhat a negatív emisszióhoz. Emellett a hagyományos mezőgazdasági termelés alól felszabadított földterületek erdősítésével tovább csökkenthető a CO₂-kibocsátás (GREENE *et al.* 2016).

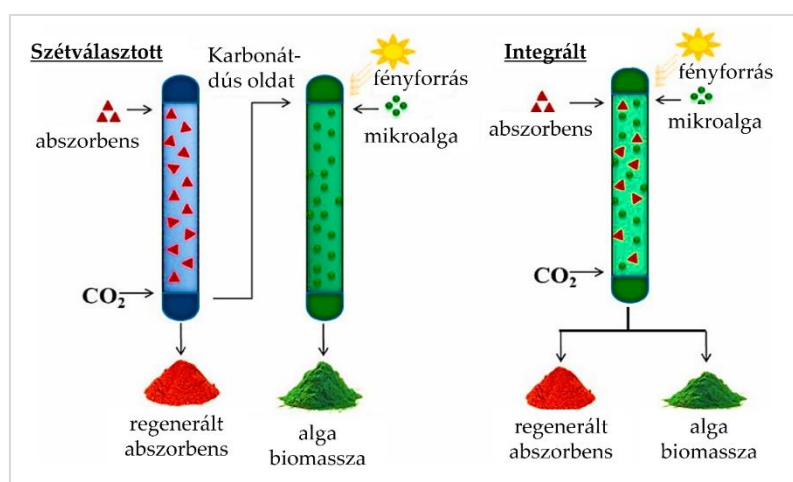
A dolgozatomban modellezett módszer elősegíti a mezőgazdasági hulladékként keletkező WBA iparban történő felhasználását a CCS technológiában való alkalmazás révén.

A WBA vizes kivonata ugyanis erősen lúgos kémhatású, amelyet hatékonyan lehet mosóoldatként alkalmazni a füstgázok CO₂-tartalmának elnyelésére. Az abszorbeálódott szén az algák számára felvehető, karbonátos formában van jelen. Az algák növekedésük során újralúgosítják a közeget, ugyanis a fotoszintézis során a HCO₃⁻-ből CO₂ és OH⁻ keletkezik, amihez az algasejtek magas CO₂-megkötési affinitása jelentős mértékben hozzájárul (SHIRAIWA *et al.* 1993). A mikroalgák rendkívül hatékonyak a CO₂ megkötésében, mivel területegységenként jóval több CO₂-t képesek elnyelni, mint a szárazföldi növények, amelyek növekedését a talaj, a víz és az éghajlati feltételek nagymértékben befolyásolnak. A kontrollált mikroalga-termesztés során a nedvességveszteség minimalizálható, ami magasabb fotoszintetikus hatékonysághoz és nagyobb CO₂-abszorpcióhoz vezet (BROWN és ZEILER 1993). Természetes körülmények között a szén általában nem korlátozza az algák növekedését (GOLDMAN *et al.* 1972), de az alacsony légköri CO₂-koncentráció (~0,042%) nem elegendő az intenzív algatermesztéshez. Ennek leküzdésére mesterséges szénforrásokat, például nátrium-hidrogén-karbonátot vagy sűrített CO₂-t adnak a termesztési rendszerekhez, bár ezek költségesek lehetnek (BECKER 1994). A jelenlegi kutatások éppen ezért a költséghatékony, fenntartható CO₂-forrásokra, többek között az erőművi füstgázokra, amelyek akár 15% CO₂-t tartalmazhatnak (VUNJAK-NOVAKOVIC *et al.* 2005, YOO *et al.* 2010, HO *et al.* 2011), vagy az anaerob emésztésből származó biogázokra (MANN *et al.* 2009, KAO *et al.* 2012, FEKETE 2014) összpontosítanak.

A doktori disszertációmban bemutatott és optimalizált technológia csak zárt fotobioreaktorban történő alkalmazásra alkalmas. Nyílt medencés rendszerekben a beinjektált CO₂ gáz gyorsan átbuborékol a vízrétegen, amelynek a megfelelő megvilágítás érdekében elég sekélynek kell lennie, majd távozik a légkörbe. Következésképpen a nyílt rendszereket nem lehet hatékonyan alkalmazni a CO₂ megkötési technológiák során (ABOU-SHANAB 2015, NARALA *et al.* 2016, EGBO *et al.* 2018, BOŠNJAKOVIĆ és SINAGA 2020). A javasolt módszer szekvenciális megközelítést alkalmaz, ahol a CO₂ abszorpciós fázis térben elkülönül a mosó oldat regeneráció helyétől, ahol az algabiomassza termesztése és a szénmegkötés zajlik. Ennek eredményeként az alga termesztés során nincs szükség CO₂ diffúzióra, bár a fotoszintézis során keletkező oxigént egy szelepen keresztül el kell vezetni. A kialakított rendszer elősegíti a szénmegkötés hatékonyságát, a gázvesztések minimalizálásával és az ellenőrzött termesztési feltételek fenntartásával.

A mikroalgákra alapozott CCS ígéretes megoldásnak tűnik, mivel bizonyos becslések szerint az atmoszférikus oxigén körülbelül felét a mikroalgák termelik, miközben

fotoautotróf növekedésükhöz CO_2 -t használnak fel (TABATABAEI *et al.* 2011). A mikroalgák alapú CCS stratégiák alkalmazása számos előnnyel járhat. A szárazföldi növényekhez képest a mikroalgák jóval gyorsabban szaporodnak és hatékonyabban kötik meg a CO_2 -t. A kémiai módszerekkel ellentétben – amelyek során a CO_2 és a felhasznált abszorbensek ártalmatlanítása szükséges – a mikroalgák teljes mértékben képesek újrahasznosítani a CO_2 -t, a fotoszintézis során kémiai energiává alakítva azt. A keletkező energia később felhasználható az üzemanyagok előállítása során (BONENFANT *et al.* 2003, DEMIRBAS 2004). A kémiai CO_2 -méréselés energiaigényes és költséges, továbbá gazdasági szempontból gyakran kizárólag a CO_2 -jóváírásokra támaszkodik. Ezzel szemben a mikroalgák alapuló CO_2 -megkötés gazdaságilag előnyös lehet a bioüzemanyagok és más értékes biotermékek előállítása során is (WANG *et al.* 2008). Az integrált CO_2 -abszorpciós mikroalga-rendszerek kétféle elrendezésben valósíthatók meg (14. ábra) (GOSWAMI *et al.* 2024).



14. ábra: Az abszorpciós-mikroalga hibrid CO_2 megkötési rendszerek két típusa: a szétválasztott és az integrált elrendezésű kialakítás (GOSWAMI *et al.* 2024)

A szétválasztott rendszer esetében a CO_2 megkötése abszorbensekkel történik a füstgázból, majd a CO_2 eltávolítását követően karbonátban gazdag vizet pumpálnak egy fotobioreaktorba (14. ábra). A szétválasztott elrendezés megakadályozza, hogy az abszorbensek közvetlenül érintkezzenek a mikroalgákkal, amivel elkerülhetők az alga sejteket érő toxikus hatások, ezzel javítva a termelékenységet (CHI *et al.* 2011). Az integrált módszerben az abszorbenseket közvetlenül a mikroalga természetközeghez adják, ahol azok bikarbonátként (HCO_3^-) oldódnak fel, amit a mikroalgák CO_2 -koncentráció mechanizmusaik révén hasznosítanak. Az abszorbensek megfelelő kiválasztása – például alacsony toxicitású tercier aminok – elengedhetetlen, mivel ez a módszer stabil szénforrást igényel (SONG *et al.* 2019). A fenti osztályozás alapján szétválasztottrendszer választottam

ki modellezésre, amelyben az algák külön regenerálhatják az abszorbenseket, így a fotobioreaktort nem feltétlenül szükséges a füstgáz kibocsátó létesítmény közvetlen közelében telepíteni.

2.7.4 A biomassa felhasználási módok értékelése a szén-megkötés hatékonyságának szempontjából

A mikroalga-termesztés azért vált az elmúlt évtizedekben egy kiemelkedően fontos biotechnológiai ágazattá, mert egyre több olyan feldolgozóipari szektor épül az algabiomassa hasznosítására, amelyeket folyamatosan növekvő alapanyagigény jellemez. Az algabiomassa ipari felhasználása igen szerteágazó és sokrétű (2.5. fejezet, M4). Kezdetben kizárólag élelmiszerként tekintettek rá, azonban mára inkább táplálék-kiegészítőként vagy állatok takarmányaként hasznosítják kiváló beltartalmi tulajdonságai miatt, de egyre több területen alkalmaznak olyan komponenseket, amelyeket az egyes algafajokból tudnak a leggazdaságosabban kinyerni (FEKETE 2016).

Az algabiomassa ipari és mezőgazdasági hasznosítása egy rohamosan fejlődő terület, így évről évre az algabiomassa újabb alkalmazási módjait fedezik fel többek között a gyógyszeriparban, vagy a növényvédelemben. A bioüzemanyag gyártás egy igen régóta vizsgált felhasználási területe az algáknak, gazdaságossági okokból azonban nem tudott elterjedni egyelőre, továbbá a kőolajból származó üzemanyagok kiváltásához hatalmas mennyiségű biomassa előállítására van szükség, amit meg is lehetne oldani az algafajok rendkívül jó növekedési arányának köszönhetően. Ráadásul az első generációs bioüzemanyagokkal szemben az alga esetében nem jelentkeznek morális problémák a termőföldek hasznosítása kapcsán, hiszen algát termeszthetünk a tengerek felszínén és művelésre alkalmatlan területeken is. A megtermelt algát viszont el kell választani a vizes közegtől, amire jelenleg csak igen költséges megoldásokat ismerünk (FEKETE 2016). A mikroalga-biomasszában alapuló energiatermelés különböző biokémiai, termokémiai, kémiai és közvetlen égési folyamatokon keresztül történhet, amely folyamatok számos végterméket eredményezhetnek.

Zieliński és munkatársai (2023) szerint a hosszú távú termékek, amelyek mikroalga-biomassa felhasználásával készülnek és CO₂-t tárolnak, a következők: biokarbon, biostimulánsok, bioplasztikák és a biocement. A biokarbon, ami kialakításának köszönhetően mikropórusokban igen gazdag és heteroatomokat tartalmaz, számos területen alkalmazható, úgy, mint például a szuperkondenzátorokban, a CO₂-megkötés során és az oxigénredukciós reakciók katalizátoraként. A biokarbon olyan szénalapú szilárd anyag,

amely megújuló és fenntartható alapanyagokból, valamint azok kombinációiból készül termokémiai átalakítással magas hőmérsékleten ($>350\text{ }^{\circ}\text{C}$), oxigénmentes vagy oxigénszegény környezetben. A talajkezelési és üzemanyag célú felhasználásokon túl, alkalmazásuk kiterjedt a polimer kompozit előállítás, az energiaipar és a környezetvédelemi területekre is, ami kulcsfontosságú stratégia lehet a hagyományos fosszilisalapú szénanyagok helyettesítésére, továbbá a fenntartható fejlődés és a körforgásos gazdálkodás területeinek fejlesztése során (MOHANTY *et al.* 2024, THAKKAR *et al.* 2024).

Az algákból származó biostimulánsok fenntartható és költséghatékony alternatívát kínálnak a szintetikus folyékony műtrágyákkal szemben, támogatva a környezetbarát mezőgazdaságot (RONGA *et al.* 2019). A mikroalgák évszázadok óta a mezőgazdasági rendszerek részét képezik és az 1950-es évek óta célzottan alkalmazzák őket a növénytermesztési rendszerekben. A mikroalgák mezőgazdasági alkalmazásával javulás érhető el a talajok minőségében és a termények minőségében, továbbá nagyobb terméshozamok érhetők el. A mikroalgák alkalmazását követően a gyümölcsök és gabonák megnövekedett fehérje-, vitamin- és antioxidáns-tartalmát figyelték meg. A talaj egészségügyi mutatóinak (pl. szervesanyag-tartalom, makro- és mikroelem-tartalom), valamint a talaj aggregáltságának javulása is megfigyelhető volt az alkalmazást követően, miközben a nehézfém-toxicitás, a sótartalom és a szikesedés problémák enyhültek (NICHOLS *et al.* 2020). A mikroalgák hozzájárulnak olyan alapvető mezőgazdasági szükségletekhez, mint a biológiai nitrogénkötés és a talaj foszforciklusa, továbbá kedvező hatást gyakorolnak a talajmikroorganizmusokra és a növények növekedésére. A mikroalgáknak fontos szerepe lehet a biokontroll és a talajstabilizáció elősegítésében a talaj tápanyagciklusai, a fitohormonok, illetve a gyökérkapcsolatok révén, továbbá alkalmazásukkal elkerülhető a talaj szervesanyag-tartalmának kimerülése (ALVAREZ *et al.* 2021). Mindezekon túl az élő algakultúrák szántóföldi alkalmazása javíthatja a talajélet minőségét a felső rétegekben, ott, ahol a mikroalgák endemikus fajok és a mikrobiom alapvető részét képezik (STARKS *et al.* 1981, JOSEPH és RAY 2024).

Az algákból származó biopolimerek fenntartható alapanyagokból készülnek, biológiailag lebomlanak és biokompatibilisek, valamint teljesítményük a hagyományos termoplasztokéhoz hasonló, így megoldást kínálnak a petrokémiai műanyagok okozta környezeti problémákra (ONEN CINAR *et al.* 2020). Egyedi tulajdonságaik, így például biológiai lebonthatóságuk és biokompatibilitásuk révén számos területen alkalmazhatók (pl. orvosi eszközök, implantátumok, sebkötözők vagy gyógyszeradagoló rendszerek gyártása) (RAHMAN és MILLER 2017). A biocement versenyképes alapanyagként szolgál a

hagyományos termékekkel szemben. Gazdaságosan és környezetbarát módon gyártható, mivel nem igényel magas hőmérsékletet. A biocementet sérült szerkezetek javítására és erodáló közetképződmények megerősítésére használják (IRFAN *et al.* 2019, IBRAHIM *et al.* 2023).

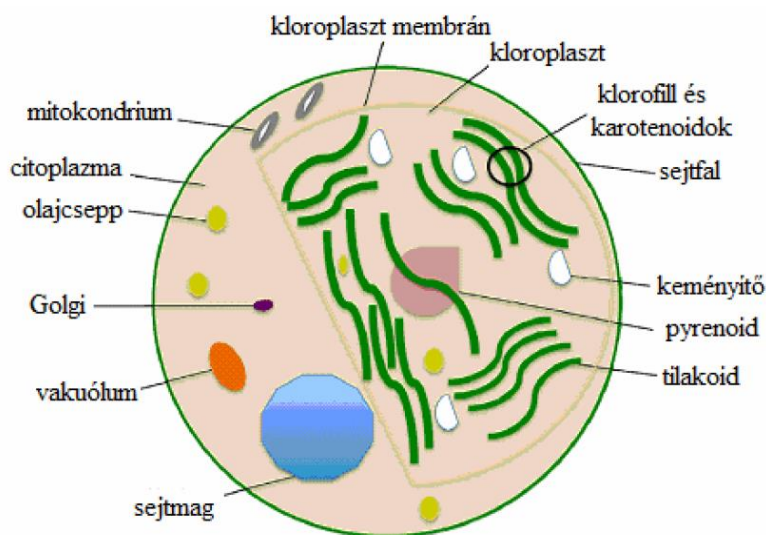
2.7.5 A szén-megkötésére alkalmas *Chlorella vulgaris* mikroalga bemutatása

Az eukarióta, egysejtű, zöldalgák (*Chlorophyta*) közé tartozó mikroalgát, a *Chlorella vulgaris*-t évtizedek óta nagy tudományos és kereskedelmi érdeklődés övezi. A *C. vulgaris* az egyik leggyakrabban használt indikátor faj a különböző környezeti monitoring- és ökotoxikológiai vizsgálatokban, mivel laboratóriumi körülmények között könnyen fenntartható és gyors szaporodásra képes még szélsőséges éghajlati feltételek mellett is (GÖRS *et al.* 2009). Magas fehérje- (51–58% szárazanyag-tartalomra vonatkoztatva), szénhidrát- (12–17%) és lipidtartalommal (14–22%) bír (SPOLAORE *et al.* 2006, BITO *et al.* 2020), valamint egy vitaminokban, ásványi anyagokban, aminosavakban és nyomelemekben gazdag algafaj (SPOLAORE *et al.* 2006, RENAUD *et al.* 1994, KHAN *et al.* 2018, CORONADO-REYES és GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ 2023). A pigmenteket tekintve többek között klorofill-a-t, klorofill-b-t és karotinoidokat (pl. β -karotint, anteraxantint és luteint) tartalmaz (SANSAWA és ENDO 2004), így a *C. vulgaris* nagy figyelmet kapott az ipari, (bio)technológiai és a táplálékkiegészítők előállítását célzó alkalmazásokban rejlő potenciális előnyei miatt (SPOLAORE *et al.* 2006, KHAN *et al.* 2018).

A *C. vulgaris* autotróf, mixotróf és heterotróf módon is képes növekedni, azonban mixotróf körülmények között viszonylag több biomassza megtermelésére képes (SINGH és SINGH 2015). A *C. vulgaris* könnyen termesztető nyílt medencékben vagy fotobioreaktorokban a különböző ipari felhasználások során. A *C. vulgaris* termelésének és fogyasztásának szempontjából Japán és Tajvan kiemelkedik a közel 3500 tonnás éves termelés alapján (LIN 2005, ANDRADE *et al.* 2018), azonban 2021-ben a *Chlorella* globális piacát Európa uralta (ALIGA 2024, PHYCOM 2024, ALGOMED 2024).

A *C. vulgaris* sejtek átmérője átlagosan 2–10 μm , mivel nem rendelkezik mozgásszervekkel, önálló mozgásra nem képes. A fiatal sejtek sejtfala vékony, de az idő előrehaladásával megvastagszik a növekvő glükózamin-tartalom miatt. (SAFI *et al.* 2014). A *C. vulgaris* egyetlen kloroplaszt-típusú szintesttel rendelkezik, amely kettős membránnal határolt (15. ábra). A külső membrán könnyen átjárható, míg a belső membrán anyagáramlását transzportfehérjék szabályozzák. A belső membrán tere, a sztóma, a tilakoid

membránból felépülő gránumokat tartalmazza, amelyek a fény hasznosításáért felelős fotonrendszereket foglalják magukba (STAEHELIN 1986). A kloroplasztban keményítőszemcsék és olajcseppek találhatók, amelyek tartaléktápanyag-forrást biztosítanak a sejt számára. A kloroplaszt része a pirenoid, amely nagy mennyiségben tartalmaz ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz-oxigenáz (RuBisCO) enzimet, így ez a CO₂-fixálás (Calvin-ciklus, sötét reakciók) központja. A *C. vulgaris* termesztési körülményei jelentősen befolyásolják a sejtek morfológiáját (pl. sejtméret, sejtfal) és beltartalmi összetételét (pl. szintestek) (KISS 2024). Az algasejtek CO₂-t használnak fel a fotoszintézis során, így az alga sejtek növekedése növelhető, ha a természetközvet 1–5% CO₂-t tartalmazó dúsított levegővel látjuk el. Ugyanakkor a túl magas CO₂-szint gátolhatja a növekedést vagy károsíthatja a sejteket a pH-változások következtében (RICHARDSON *et al.* 1969, GOLDMAN *et al.* 1982, JUNEJA *et al.* 2013).



15. ábra: A *Chlorella vulgaris* mikroalga sejtfelépítése (KISS 2024)

2.7.6 A szén-dioxid kezelés várható hatásai az alganövekedésre

A megnövekedett CO₂-koncentráció hatásait több mikroalgatörzs (pl. *Arthrospira platensis*, *Chlorella ellipsoidea*, *C. vulgaris*, *Gloeotila pulchra*, és *Elliptochloris subsphaerica*) növekedésére és életképességére vizsgálták. A termesztőközeget állandó CO₂-szinteken (0,04%, 3%, 6% és 9%) tartva a legmagasabb biomassza-növekedési rátát (0,37 g/L/nap) a *C. vulgaris* esetében figyelték meg a 3%-os CO₂-szint mellett (CHUNZHUK *et al.* 2023). A megnövekedett CO₂-szint különböző mértékben befolyásolhatja az algák növekedését. A szárazanyag-tartalom 95%-os növekedését

tapasztalták a *C. vulgaris* esetében 1%-os CO₂-dúsított levegő adagolását követően a kontrollhoz képest, ami alátámasztja a magas CO₂-szintek alkalmazását a maximális termelékenység érdekében (AZOV 1982). Ugyanakkor extrém magas CO₂-szinteken (40%) a sejten kívüli karbonanhidráz-aktivitás jelentősen lecsökkent, míg sejten belüli aktivitás szinte nem volt tapasztalható (PESHEVA *et al.* 1994). 100 ml-es lombikokban elvégzett vizsgálatok során 0,93 és 0,69 g/L/nap CO₂-megkötési rátákat határoztak meg 2, illetve 1 g/L NaHCO₃ adagolását követően (RATOMSKI *et al.* 2021). A hagyományosan levegőztetett algatermesztés esetében meghatározott növekedési ütemhez képest, a CO₂-buborékoltatás szignifikánsan magasabb növekedési rátákat eredményezett (0,045–0,075 g/L). A 15%-os CO₂-tartalmú modell füstgáz alkalmazása közel tízszeres növekedési ütemet eredményezett (0,624 g/L/nap) (WANG *et al.* 2008). A lipidtartalom és a biomassza termelékenysége azonban lecsökkent a CO₂-koncentráció növekedésével (2–15% CO₂) (CHIU *et al.* 2009). A *C. vulgaris* gyorsan képes alkalmazkodni a magasabb CO₂-szintekhez (5–12%) a fotoszintézis károsodása nélkül (NIELSEN és WILLEMOES 1966), továbbá sejtnövekedés volt tapasztalható még a 18%-os CO₂-szint mellett is, ami a füstgázok CO₂-csökkentésére való alkalmazhatóságát sugallja (DE MORAIS és COSTA 2007). Mindemellett CO₂-kiegészítéssel elkerülhető a pH gátó hatása a szénben korlátozott kultúrákban (GOLDMAN *et al.* 1982, HEUBECK *et al.* 2007). Egy másik tanulmány szerint a hagyományos bioreaktorokhoz képest, a membrán-fotobioreaktor 0,95–5,40-szer hatékonyabban kötötte meg a CO₂-t (FAN *et al.* 2007). Az alkalmazott rendszer egy szekvenciális módszeren alapult, amelyben az algák szénmegkötése során a CO₂-abszorpció és az oldat regenerálás elkülönítve valósult meg.

Összefoglalva tehát a mikroalga-biotechnológia hatékony megoldást nyújt a CO₂ megkötésére, mivel az algák fotoszintézise gyors és nagy mennyiségű szén-dioxidot alakítanak át biomasszává. A mikroalgák sokkal gyorsabban növekednek, mint a szárazföldi növények, így rövid idő alatt jelentős CO₂-mennyiséget képesek elnyelni. A *Chlorella vulgaris* különösen alkalmas erre a célra, mivel magas fotoszintézisének hatékonysága mellett szélsőséges körülmények között is életképes, és ipari környezetben is alkalmazható. Emellett a *C. vulgaris* nemcsak a szén-dioxidot hasznosítja, hanem értékes melléktermékeket, például fehérjét, lipideket és bioüzemanyagot is előállít, ami további gazdasági előnyöket jelent. Az ipari üzemek és erőművek füstgázait közvetlenül fel lehet használni az alga tenyésztésére, így csökkenthető a környezeti kibocsátás. A zárt

fotobioreaktorok alkalmazásával a CO₂-megkötés hatékonysága tovább növelhető, miközben minimalizálható a szennyeződés kockázata. A *C. vulgaris* biomasszája további ipari felhasználásra is alkalmas, például takarmányként vagy táplálékkiegészítőként, így nemcsak a környezetvédelmet szolgálja, hanem gazdasági hasznót is hoz. Az algaalapú CO₂-megkötési technológiák egyre nagyobb figyelmet kapnak, mivel egyszerre csökkentik a szénlábnyomot és fenntartható alapanyagot biztosítanak több iparág számára.

A szakirodalomra alapozva ezért a demonstrációs kísérletemnél a *Chlorella vulgaris* mikoralgára és a zárt termesztő rendszerre (fotobioreaktor) esett a választás, amelyben lúgos abszorbens alkalmazásával, szétválasztott rendszerben történik a CO₂ leválasztása és az algatermesztés. Ezt modellezve azt feltételezem, hogy az eredményeim a módszer méretnövelése során jól hasznosíthatóak lesznek.

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. 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 (GRIFFITHS és HARRISON 2009), 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. Az alkalmazott tápoldat pontos összetételét (pH = 7,0 ± 0,2, 25°C) a 10. táblázat mutatja be. A tenyészetek fenntartása Erlenmeyer-lombikokban, meghatározott hőmérsékleten (25 ± 1°C) és fényviszonyok (folyamatos megvilágítás, teljes spektrumú nappali fényt kibocsátó fénycsövek (Osram Biolux, T8 L30W/965 Daylight 6500K, 26 mm x 895 mm) mellett valósult meg.

10. táblázat: A kísérletek során alkalmazott tápoldat pontos összetétele

Összetevő	Koncentráció (g/L)
nátrium nitrát	1,000
dikalcium-foszfát	0,250
magnézium-szulfát	0,513
ammónium-klorid	0,050
kalcium-klorid	0,058
vas(II)-klorid	0,003

Az algatenyészetek fenntartása során az Ördög Vince (1981) által leírt módszertan alapján titráló lombikokat használtam, amelyeket egy üvegpalcra helyeztem. Az üvegpalc alá kerültek a fénycsövek, 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 mm) polivinil-difluorid (PVDF) fecskendőszűrőn keresztül szűrtem meg, ezzel biztosítva a steril és kontrollált kísérleti, illetve termesztési körülményeket.

3.2. 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 (16. ábra). 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 (FEKETE *et al.* 2024a).



16. ábra: A alga-törzstenyészetből előállított hígítási sor

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.

3.2.1. Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása

Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása során az algaszuszpenziókat olyan steril membránszűrőkön (Whatman 10401170, Maidstone, UK, cellulóz-nitrát membrán, pórusméret = $0,45\ \mu\text{m}$, $d = 47\ \text{mm}$) szűrtem át, amelyeket előzőleg desztillált vízzel átmostam. A szűrést követően a szűrőlapokat kiszárítottam, majd lemértem. A kiszűrt algasejteket $105\ ^\circ\text{C}$ -on 24 órán át szárítottam a szűrőpapírral együtt (17. ábra), majd analitikai mérlegen mértem le a közös tömegüket. A mérés pontosságának biztosítása érdekében az algával együtt kiszárított szűrőpapírt visszahelyeztem a szárítószekrénybe további 3 órára, majd visszamértem, így megbizonyosodhattam arról, hogy a mérés valóban a tömegállandóság eléréséig zajlott.



17. ábra: Az algabiomassza szűréssel történő meghatározása

3.2.2. Az algabiomassza bepárlással történő meghatározása

A különböző hígítású algaszuszpenziókat mérőlombikokban rázatással homogenizáltam, majd három ismételtsben ($3 \times 40\ \text{ml}$) izzítótégelyekbe adagoltam. A tégelyeket $90\ ^\circ\text{C}$ -on szárítószekrényben bepároltam tömegállandóságig, majd lemértem a visszamaradt tömeget. Minden egyes hígítás esetében 3-3 ismételtsben 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 (18. ábra) 90 °C-on tömegállandóságig szárítottam szárítószekrényben. Az algamentes felülúszó folyadék fázis térfogategységre jutó átlagos visszamaradt tömegét három ismételtsben határoztam meg, majd levontam a centrifugálatlan, szintén bepárlással meghatározott algakonzentrációkból. Az oldott sótartalmat, amely potenciálisan a tápoldatból származhatott, így minden esetben levontam az összes visszamaradt száraztömegből, ezzel megkaptam a nettó algabiomassza tömeget.



18. ábra: A vizsgált algaszuszpenziók és a lecentrifugált minták a bepárló edényekben a szárítás előtt és után

3.2.3. Az algabiomassza meghatározása a magnéziumtartalom alapján

A magnéziumkoncentrációk meghatározása során a bepárlás után (lásd 3.2.2. fejezet) visszamaradt biomasszamintákat izzítószekrénybe helyeztem és 3 órán keresztül izzítottam 550 °C-on. A minta Mg tartalmát a hamuból (19. ábra) savas hidrolízis módszerrel kivonatoltam (ARSLAN és TYSON 1999, MÓNOK és FÜLEKY 2017), majd a koncentráció meghatározása mikrohullámú plazma atomemissziós spektrométerrel (4210 MP-AES, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) történt.



19. ábra: A magnéziumtartalom feltárása az algaminták izzítása után visszamaradt hamuból savas hidrolízis módszerrel

3.2.4. 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 (FELFÖLDY 1987). Az alkalmazott módszer metanolt használ a klorofill-a-pigment algasejtekből történő kivonásához azáltal, hogy a szerves oldószer a melegítéssel együtt deaktiválja a pigmenteket oldó enzimeket (ISO 1992, GRÓSZ *et al.* 2019). A klorofill-a-tartalom meghatározás első lépéseként a mintákat szűrőpapíron (Whatman 10401170, pórusméret = $0,45\ \mu\text{m}$, $d = 47\ \text{mm}$) 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) (20. ábra) 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 (FELFÖLDY 1987). A vizsgálatok során alkalmazott mérési hullámhosszak következők (20. ábra):

1. mérés E_{750} : a zavarosság értéke (többnyire kicsi)
2. mérés E_{666} : a klorofill-a első mérési hullámhossza
3. mérés E_{653} : a klorofill-a második mérési hullámhossza

A számítás mente:

$$X1 = E_{666} - E_{750}$$

$$X2 = E_{653} - E_{750}$$

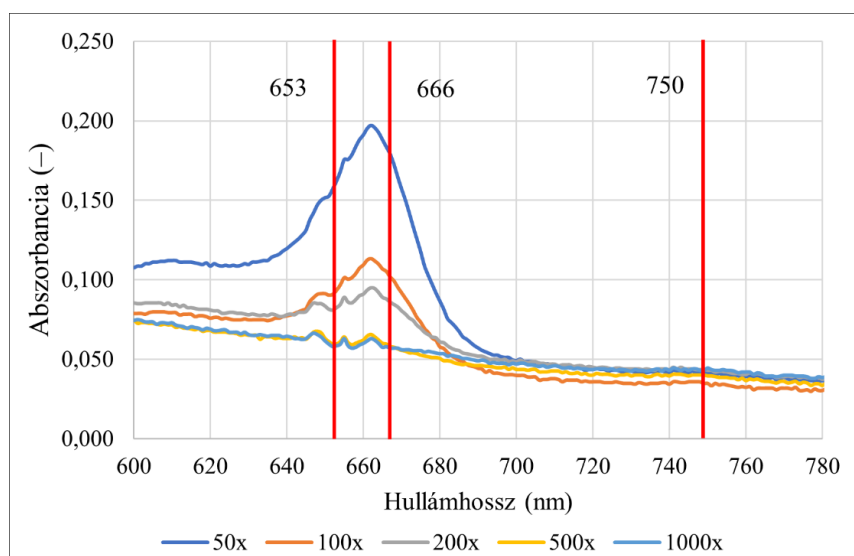
A klorofill-a tartalom meghatározása során alkalmazott képlet:

$$\text{klorofill-a-tartalom } (\mu\text{g/L}) = \frac{(17,12 \cdot X1 - 8,68 \cdot X2) \cdot m}{M}$$

ahol:

m = extrakcióhoz használt metanol mennyiség (20 ml)

M = leszűrt mintamennyiség (ml)

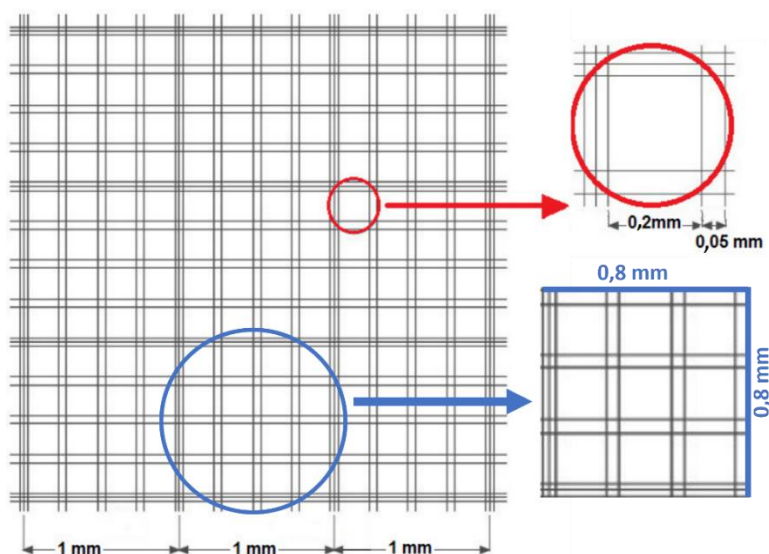


20. ábra: A klorofill-a-tartalom meghatározása során alkalmazott mérési hullámhosszak bemutatása a nagy hígítású minták átlag spektrumain

A Felföldy-módszer által javasolt mintamennyiséghez (500 mL) képest, a saját minták jóval kisebb mennyiségben álltak rendelkezésre, ezért csak 150 mL szűrletet készítettem. A sűrűbb algaszuszpenziók esetében azonban még a levegőpumpa segítségével sem lehetett pár mL szűrletnél többet előállítani. Az egyes minták esetében leszűrt, valamint a számítások során alkalmazott mintamennyiségeket az eredmények ismertetésekor tüntetem fel.

3.2.5. Az algabiomassza meghatározása a minták sejtszáma alapján

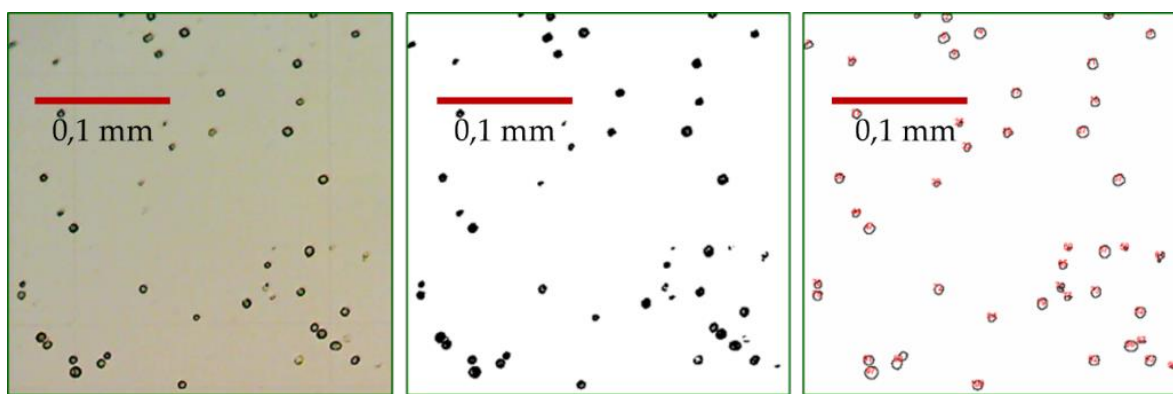
A hígítási sorozat különböző tagjaiból származó algamintákat két ismétlésben kémcsövekbe adagoltam. Minden vizsgált mintáról két-két képet készítettem egy BTC BIM 105M mikroszkóppal (Castell Nova Kft., Sopron, Magyarország), amelyhez egy MicroQS 2 megapixeles SPCMOS02000KPA mikroszkópkamerát (Micro Q 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 $0,64 \text{ mm}^2$ területet vágtam ki digitálisan a részletes képelemzést és sejtszámlálást megelőzően (21. ábra). A képkivágást előzetesen a számlálókamra ismert hosszúságú éleihez igazítva végeztem el, majd miután meghatároztam, hogy az egységnyi terület 1110×1110 pixelből áll, ezt a méretet véletlenszerűen vágtam ki a digitális mikroszkópképből. Ismerve a Bürker-kamra $0,1 \text{ mm}$ -es mélységét, az egységnyi vizsgált felület egy $0,064 \text{ mm}^3$ térfogatú szuszpenzió sejtszámlálására biztosított lehetőséget.



21. ábra: A Bürker-féle számlálókamra $0,64 \text{ mm}^2$ egységnyi területe (ALBANESE *et al.* 2015 alapján szerkesztve)

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 (22. ábra). Először egy háttér korrekciós folyamatot alkalmaztam világos háttérrel, majd a képet 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 (FEKETE *et al.* 2024a).

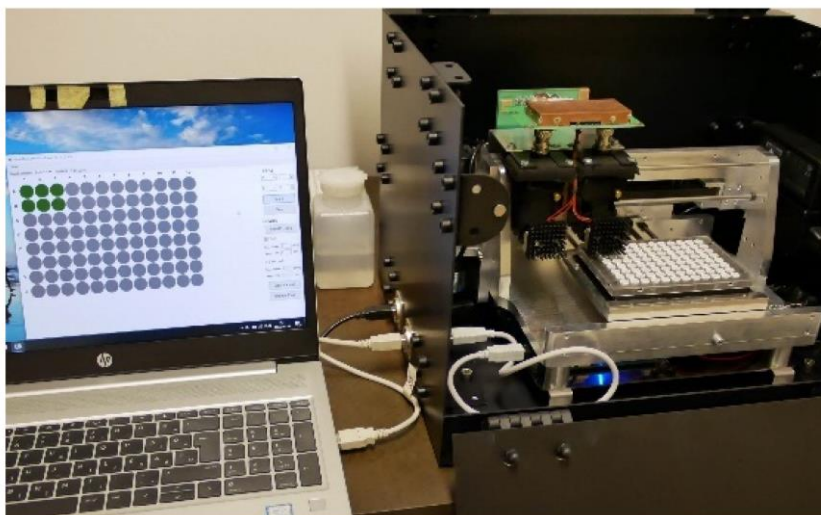


22. ábra: Mikroszkópos kép alapján végzett algasejt-számlálás képfeldolgozó szoftver használatával: mikroszkópos képrészlet (balra), mikroszkópos képrészlet a háttér korrekciós folyamat után (középen) és a sejtszámlálási folyamat után az *ImageJ* szoftver alkalmazásával (jobbra)

3.2.6. Az algabiomassza meghatározása a gerjesztett klorofill-a fluoreszcencia mérése alapján

Az algasuszpenziók 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 (LÁZÁR *et al.* 2023). 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 (LÁZÁR *et al.* 2023). A DFS olyan léptető motorral van felszerelve, amely lehetővé teszi a detektorfejek

mozgatását a 96-lyukú mikrolemezek lyukai felett, így az *RFU* meghatározása gyors és hatékony módon, valamint egyedileg is megvalósítható a mikrotálcák mintatartó lyukaiban (23. ábra). 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 (LÁZÁR *et al.* 2023).



23. ábra: A fluoreszcens mérések során alkalmazott dikroikus fluorométer rendszer (*DFS*) (LÁZÁR *et al.* 2023)

3.2.7. 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.

3.2.8. 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 (BorTerres 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.

3.3. A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet bemutatása

3.3.1. *A fabiomassza tüzelésből származó hamu kivonat előállítása*

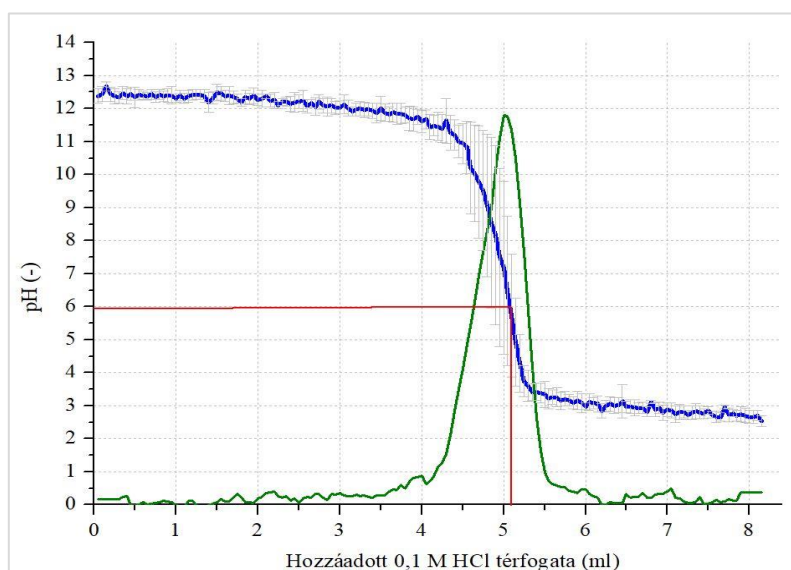
A választott *C. vulgaris* mikroalgafaj szénfelvételét vizsgáló modellkísérletben használt fahamu minta a Szakolyi Biomassza Erőmű szálló pernyéjéből származott. Az erőmű helyben kitermelt, faalapú biomasszát hasznosít, amelyet a helyszínen tárolnak és darabolnak fel az égetés előtt. Az üzem kapacitása 19,8 MW, hatásfoka 30,7%, 7900 órás éves üzemidővel. A vizsgált faalapú-biomassza hamu (*wood biomass ash, WBA*) tulajdonságait a biomassza szezonális változása mellett befolyásolhatja az égési idő, a hőmérséklet, a hűlési idő és az alapanyag minősége is (KLEBERCZ *et al.* 2013, MOKKA 2018). A laboratóriumban 1:10 arányú desztillált vízzel készült kivonatot állítottam elő a fahamu mintából, majd a kivonatban megtalálható elemek mennyiségét atomemissziós spektrométer (MP AES, Agilent 4210, Santa Clara, CA, USA) használatával határoztam meg három ismételtsben (11. táblázat).

A kivonatban mért magas kálium- (K) és kalcium- (Ca) koncentrációk összhangban voltak a korábbi kutatások által jelentett magas értékekkel (KOŽUCH *et al.* 2023, ADAMCZYK *et al.* 2024). A hamu kivonat 24 órás ráztatását követően az oldatot

szűrőpapíron (Whatman No. 42, pórusméret = 0,25 μm) szűrtem át, majd a szűrlet teljes lúgosságát automata potenciometrikus titrátorral határoztam meg (Auto Titrator SCHOTT Instrument TitroLine easy Germany) három ismételtsben. Az átcsapási pontot az Origin szoftver (6.0 verzió) differenciálfüggvény illesztése segítségével határoztam meg (24. ábra). A kísérlet során 5,1 mL savat adtam 10 mL kivonathoz, ami alapján a $[\text{OH}^-]$ koncentrációt a hamu kivonatban 0,51 mol/kg volt és ami az 1:10 arányú vizes kivonatban 0,051 mol/L koncentrációnak felelt meg. A mért pH-érték 12,71 volt.

11. táblázat: A kísérletek során alkalmazott fabiomassza hamu 1:10 arányú desztillált vizes kivonatának összetétele

Összetevő	Koncentráció (mg/L)
K	2233,23 $\pm$ 67.18
Ca	546,57 $\pm$ 34.53
Al	4,30 $\pm$ 1.05
Fe	1,15 $\pm$ 0.28
Zn	0,10 $\pm$ 0.04
Cu	0,06 $\pm$ 0.01



24. ábra: A teljes lúgosság meghatározása automatikus potenciometrikus titrálassal (kék vonal: az átlagosan mért pH; zöld vonal: a mért pH első derivált görbéje; piros vonal: az átmeneti pontnak megfelelő térfogat- és pH-értékek, valamint a pH első derivált görbéjének maximuma [pH = 6,01, hozzáadott savmennyiség = 5,1 mL])

3.3.2. A modellkísérlet beállításai

Az előző fejezetben ismertetett extrakciós módszert alkalmazva (lásd 3.3.1. fejezet), 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 12. 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 $6,00 \pm 0,05$ -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) (FEKETE *et al.* 2024b). A növekedési teszt során a mintákat dugóval lezárt 500 mL-es Erlenmeyer-lombikokban helyeztem a megvilágított üvegpolcra (25. ábra).

12. 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)	Algatörzsoldat 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



25. ábra: A szénfelvételt vizsgáló modellkísérlet során kezelt algaszuszpenziók

3.3.3. 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 (MIRZAHOSSEINI és NOSZÁL 2016). A kontroll és kezelt minták esetében mindhárom párhuzamosban meghatározásra került a pH-érték.

3.3.4. Az algabiomassza-koncentráció alakulásának nyomonkövetése

Az algabiomassza-koncentráció változásainak nyomonkövetése során az optikai sűrűség meghatározásán alapuló módszert alkalmaztam a 3.2. fejezetben leírt 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 [4] egyenlet képlete szerint számoltam ki (FEKETE *et al.* 2024a).

3.3.5. 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 HCO_3^- és CO_3^{2-} CO_2 -molekulává alakul át, majd extrakciót és titrálást követően meghatározható a minta DIC-tartalma (JOHNSON *et al.* 1987). 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 (STROTMANN *et al.* 2004).

A mérések során a 3.3.2. fejezetben ismertett, CO_2 -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 (26. ábra), amelyet követően a sav összekeveredik a szuszpenzióval, majd a mintában oldott CO_2 felszabadul. A végnyomás 20 perc múlva stabilizálódott, amelyet követően rögzítettem a mért értékeket. A modellkísérlet előtt a CO_2 -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.



26. ábra: Az oldott szervesen széntartalom meghatározása az *OxiTop* készülékek használatával

Az általam ilyen formában alkalmazott módszer elvi alapját a Scheibler-kalciméteres, Magyar Szabvány (MSZ-08 0206-2:1978) szerinti vizsgálat képezi, amely során a talaj karbonáttartalmát sav hozzáadásával képződő CO₂ gáz mérése révén határozzák meg. A keletkező gáz térfogata egy mérőhenger segítségével kerül meghatározásra (MSZ 1978, KÁDÁR 1998). A szabvány szerinti közvetlen térfogatalapú megközelítéssel ellentétben az *OxiTop* eszközre alapozott módszerem a nyomásváltozásokat tudja közvetlenül mérni (FILEP és RÉKÁSI 2011). Az *OxiTop* alapú karbonát és DIC meghatározások nagy előnye lehet a CO₂-felszabadulás kinetikájának monitorozása, amely utalhat az egyes karbonátformák gáztérbe kerülésére a savas kezelés hatására. A mérési módszer alkalmazása során, a minta keverése az *OxiTop* készülékekhez kapható mágneses keverő révén standardizálható, de a sav egyenletes adagolására még további módszerfejlesztésre van szükség (FEKETE *et al.* 2024b).

3.3.6. 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-tesztel 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 alkalmazáshatósági feltételei nem teljesültek, az adatokat Kruskal–Wallis-tesztel 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.

4 EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

4.1 A különböző biomassza meghatározási módszerek összehasonlításának eredményei

A különböző algakoncentráció meghatározására alkalmas módszerek átlagos eredményeit a 13. 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.

13. 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

4.1.1. A szűréssel meghatározott algabiomassza-koncentrációk alakulása

A szűrési biomassza meghatározási módszer első, szűrési fázisa megegyezett a Felföldy-módszer szerint alkalmazott klorofill-a extrakciós eljárásban előírt művelettel. Bár közzismert tény, hogy az átszűrött szuszpenzió mennyiségével a mérés pontossága, reprezentativitása is növekszik, azonban a gyakorlatban mégis minden esetben lehetőség nagy mintamennyiséggel dolgozni. Esetemben két tényező is limitáló hatással volt erre a szándékomra: egyrészt a rendelkezésre álló mintamennyiség véges volt, ugyanis a hígítási

sorban összesen 1-1 liternyi minta állt elő minden hígításból, továbbá a vizsgálatok során alkalmazott további biomaszabecslésre alkalmazott módszerrel párhuzamos alkalmazása a további mintaigény miatt a rendelkezésre álló mintamennyiség folyamatos fogyatkozásával járt. Másrészt a szűrőpapír eltömődése szintén limitálta az átszűrhető mintamennyiségeket. A minták hígításával azonban jelentősen nagyobb térfogat átszűrése vált lehetségessé (5. számú melléklet, M5). A szűrés esetében az eredmények a 1000x-es hígítás esetében nem értelmezhetőek, mivel a szűrőpapír tömege meghaladta a szűrőpapír és az azon átszűrt algák együttes tömegét, így ezt az adatot a korrelációk felállítása során figyelmen kívül hagytam.

4.1.2. A bepárlási maradék alapján meghatározott algabiomassza-koncentrációk alakulása

A bepárlási maradék alapján meghatározott algabiomassza-koncentráció meghatározás részletes eredményei az 6. sz. mellékletben (M6) található meg, míg a 14. táblázatban a már az izzítótégelyek tömegével korrigált, 1 liter térfogatra kifejezett mennyiségek kerültek bemutatásra. A felhasznált kis mintamennyiségek (10 mL) következtében a szűrlet bepárlási maradékai a 200x-os hígítástól értelmezhetetlen, negatív értékeket vettek fel annak köszönhetően, hogy a bepárlás után az edény és a benne lévő kiszáritott szuszpenzió tömege kisebb értéket vett fel, mint az üres edény kiindulási tömege. Emiatt ezeket az adatokat a korrelációk felállítása során figyelmen kívül hagytam.

14. táblázat: A bepárlási maradék alapján meghatározott algabiomassza-koncentrációk

Hígítás (x)	Össz. bepárlási maradék (mg/L)				Szűrlet bepárlási maradéka (mg/L)				Alga konc. (mg/L)
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	
1	6062	6105	6062	6077	5330	5170	4850	5117	960
2	3073	3078	2980	3043	2690	2450	2680	2607	437
5	1163	1228	1190	1193	1090	920	1120	1043	150
10	545	445	470	487	440	390	430	420	67
20	277	303	248	276	240	230	250	240	36
50	103	103	98	101	20	130	110	87	14
100	110	63	38	70	70	40	70	60	10
200	5	10	28	14	-80	-100	-110	-97	111
500	45	30	65	47	10	20	30	20	27
1000	15	30	20	22	700	-930	30	-67	88

4.1.3. A meghatározott magnézium-koncentrációk alakulása

A Mg-koncentráció mérésére leginkább a rendelkezésre álló hamu mennyisége volt hatással. A 7. sz. mellékletben (M7) megtalálható adatokból látható, hogy az össz. bepárlási maradék esetében felhasznált 40 mL-es mintamennyiségek esetében 244 és 1 mg közötti értékeket kaptam, ami az izzítás után tovább feleződött. A szűrlet esetében pedig a felhasznált 10 mL mennyiségű oldat esetében az eredmények 53 mg és az LOD-értékek közötti tartományba estek, amik csak mintegy 20-25%-kal csökkentek az izzítás hatására. A 20x-os hígítás alatti értékeknél az eredmények feltehetően a kimutatási határ alatt voltak (7. számú melléklet, M7), ezért ebben az esetben nem zártam ki ezeket az eredményeket, mivel konvergáltak a nulla értékhez, így nem befolyásolták jelentősen a megfigyelt összefüggéseket.

4.1.4. A meghatározott klorofill-a-koncentrációk alakulása

A klorofill-a-tartalom meghatározása egy szűréssel kezdődik, amely művelet kihívásait a 4.1.1. fejezetben fejtettem ki. A levegőpumpa segítségével finom pórusú szűrőpapíron átszűrt mintamennyiségeket a 15. táblázat mutatja be.

15. táblázat: A metanolos klorofill-a extrakció során használt adatok és kapott eredmények

Hígítás (x)	Szűrlet-mennyiség (mL)	Metanol mennyisége (mL)	Optikai denzitás			klo-a (br) (µg/L)	klo-a (net) (µg/L)
			653 nm	666 nm	750 nm		
1	10	20	0,389	0,438	0,042	7518,00	7515,64
2	25	20	0,527	0,595	0,047	4165,44	4163,08
5	50	20	0,414	0,462	0,046	1569,38	1567,02
10	100	20	0,464	0,537	0,083	894,79	892,43
20	100	20	0,219	0,245	0,044	384,42	382,06
50	150	20	0,162	0,184	0,042	184,68	182,32
100	150	20	0,094	0,106	0,035	93,22	90,86
200	150	20	0,083	0,088	0,043	57,01	54,64
500	150	20	0,060	0,060	0,040	22,51	20,14
1000	150	20	0,059	0,058	0,045	14,61	12,25
vak (DV)	150	20	0,111	0,111	0,097	2,36	0,00

A módszer komplexitása miatt számos hibalehetőséget rejt magában, mégis ez a leginkább elterjedt alga meghatározási módszer, az ISO szabvány (ISO 10260:1993) is igen hasonló előkészítési eljárást ír elő (MSZ ISO 1993, GRÓSZ *et al.* 2022). Az előkészítés szűréssel kezdődik, ami sűrűbb algaszuszpenziók esetében mérési hiba lehetőséget rejthet magában.

Utána a szűrőpapír feldarabolása közben az annak felszínén lévő biomassza könnyen felkenődhet az ollóra, végül a centrifugálás során is adódhat veszteség. A benne rejlő hibalehetőségek mellett ez a módszer rendkívül időigényes is.

4.1.5. A digitális sejtszámlálás során meghatározott algasejt-koncentrációk alakulása

Az eredmények alapján látható, hogy a sejtszámlálásra alkalmazott saját fejlesztésű digitális képfeldolgozási módszer hatékonynak bizonyult (16. táblázat), ami jelentősen lerövidítheti a mérési időt, amennyiben ezt alkalmazzák más kutatók is. A mérés egyértelmű hibalehetőséget hordoz magában a parányi vizsgált mintamennyiség ($0,064 \text{ mm}^3$) miatt, amely alkalmazott térfogategység a liternek kevesebb, mint a 15 milliomod része. A hiba abból adódhat, hogy a véletlenszerűen kiválasztott területegységek kiértékelését követően, a kapott eredményt 15 625 000-rel kell felszorozni, így igen nagy szórás kerülhet a rendszerbe, ha az adott területnek nem volt megfelelő a reprezentativitása. Ez látszódik az egyes például a 2x-es hígítások eredményein, így ennek kiküszöbölésére ezt a mérést 4-4 ismételtsben végeztem el.

16. táblázat: A digitális képfeldolgozó, valamint a hagyományos Bürker-kamrás sejtszámlálási módszerek esetében meghatározott algasejt-koncentrációk

Hígítás (x)	ImageJ által meghatározott sejtszám (db/0,064 mm ³)					Sejtkoncentráció (millió db/L)					Szórás (-)
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	minta ₄	átlag	minta ₁	minta ₂	minta ₃	minta ₄	átlag	
1	6965	7429	6637	6674	6926	108828	116078	103703	104281	109536	6218
2	3369	4642	3152	4601	3941	52641	72531	49250	71891	58141	12577
5	2085	2095	2318	2235	2183	32578	32734	36219	34922	33844	2058
10	615	852	921	975	841	9609	13313	14391	15234	12438	2508
20	648	674	739	669	683	10125	10531	11547	10453	10734	732
50	265	242	248	207	241	4141	3781	3875	3234	3932	186
100	138	111	91	95	109	2156	1734	1422	1484	1771	369
200	23	22	26	50	30	359	344	406	781	370	33
500	26	24	19	26	24	406	375	297	406	359	56
1000	5	4	7	11	7	78	63	109	172	83	24

A legtöményebb minta estében a $109\,536 \times 10^6$ db algasejt esetében önellenőrzést végeztem az ImageJ által kapott pixelborítás és a saját alगतérfogat-számításom összevetése révén. Az ImageJ program erre a hígításra átlagosan 13%-os borítást eredményezett, amely eredményt a minta mélysége miatt úgy érdemes kezelni, hogy feltételezhetően ettől valamivel kisebb arányú a térben való helykitöltése az algáknak. A térfogatszámítást úgy

végeztem el, hogy a *C. vulgaris* szabályos gömb alakjának megfelelően, a szakirodalomból ismert 2–10 µm-es átmérőjével kiszámoltam az algasejt térfogatát (SAFI *et al.* 2014), majd felszoroztam a mért literenkénti sejtszámmal, így 0,45 illetve 56,67cm³-es eredményt kaptam, amik az 1 liter térfogat 0,05 és 5,67 %-át töltik ki. A kapott érték nagyságrendileg egybevág az *ImageJ* által kapott <13%-os eredménnyel. A sejttérfogat és a bepárlással kapott biomassza-tömeg alapján (17. táblázat), ki lehetne számolni az alga sűrűségét is, azonban ez a száraz tömegre vonatkozik, így kellene tudni a szárazanyag sejtben betöltött térfogatát is. A meghatározott térfogat telítettségi fok arra is engedhet következtetni, hogy a legterményebb mintánál elértem a *C. vulgaris* maximális sűrűségét, így a szakirodalomban megtalálható, nagyságrendileg nagyobb biomassza vagy sejtszám adatok nem elérhetőek a gyakorlatban. Az alga technológiák gazdaságosságának értékelése során ez nagyon fontos szempont lehet, továbbá szakmai viták alapját képezheti.

4.1.6. Az algakoncentráció indukált klorofill-a-fluoreszcencia detektáláson alapuló meghatározásának eredményei

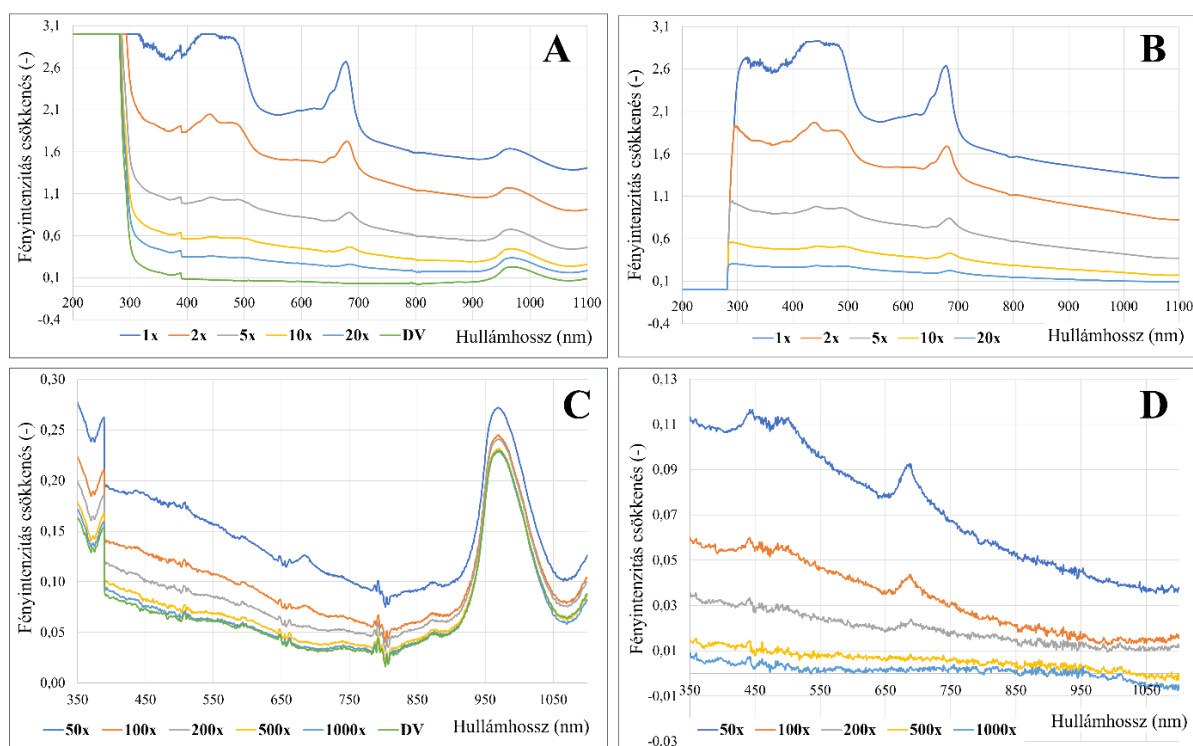
17. táblázat: A gerjesztett fluoreszcencia-mérési eredmények alapján meghatározott algasejt-koncentrációk

Hígítás	ism ₁	ism ₂	ism ₃	ism ₄	ism ₅	Átlag	Szórás
1x	1692091	1711484	1711056	1655358	1677819	1689562	23753
2x	1227482	1203043	1210321	1159442	1202315	1200521	25100
5x	849748	869577	889156	833819	827671	853994	25481
10x	643720	625668	612709	590892	577987	610195	26361
20x	382564	379591	394972	342375	345934	369087	23514
50x	187829	197701	211574	172532	177421	189411	15741
100x	120034	115349	125839	99444	100567	112247	11783
200x	73095	54923	91130	43361	54860	63474	18770
500x	30647	36130	49793	13828	32381	32556	12887
1000x	37987	22872	37691	14226	21916	26938	10501

4.1.7. Az algaszuszpenziók spektrofotometriával meghatározott optikai sűrűsége

A méréseim egyik kulcs eleme az optikai sűrűség spektrumok pontos felvétele volt, hiszen ezeket az adatsorokat kell a továbbiakban korreláltatni az összes többi, laboratóriumi módszerekkel meghatározott koncentráció-adatsorokkal. Ebből a szempontból előnyösnek mondható, hogy a spektrofotométerrel mért minták csaknem 100%-ban egybevágtak, amit

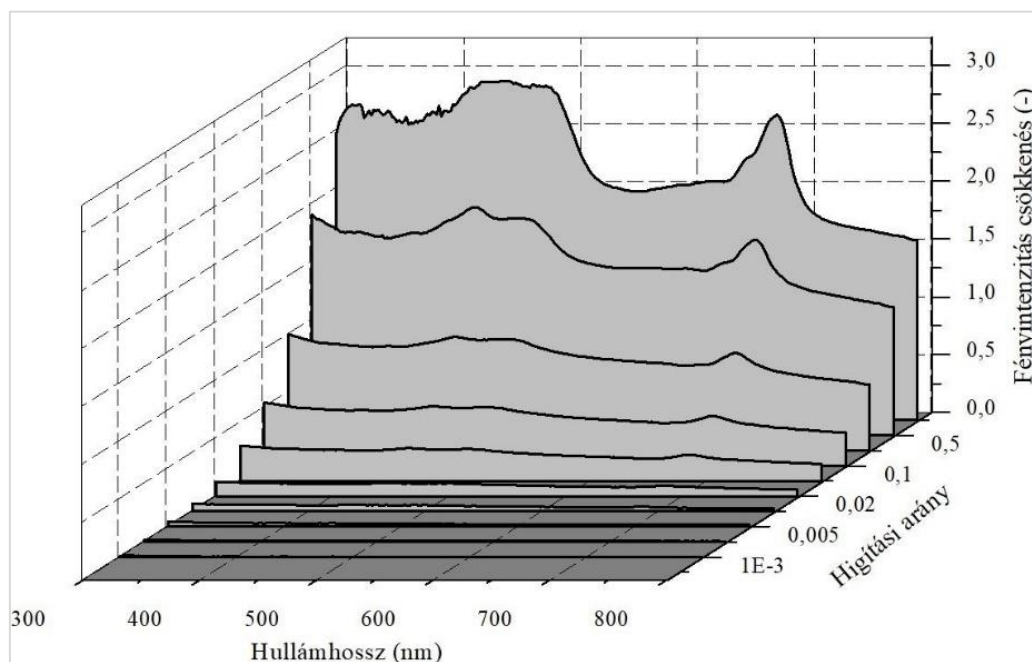
onnan lehet megállapítani, hogy a mérések során a párhuzamosan mért minták (ismétlések) adatsorait egymással szemben lineáris regresszióval összevetettem. Az eredmények alapján a korreláció közöttük rendkívül magasnak bizonyult ($R^2 > 0,999$), így a méréseket csak 2 ismételtsben végeztem el. A 27. ábrán láthatók a 2-2 ismételés átlagából képzett spektrumok külön a töményebb (A) és a hígabb (C) minták esetében. Vak kezelésként megmértem a desztillált víz spektrumát is, amit a 27. ábrán (A és C grafikon) zöld színnel tüntettem fel. Annak érdekében, hogy csak az alga által okozott fényintenzitás csökkenést vizsgáljuk és kiszűrtem a szuszpenzió háttérét adó víz hatásait, ennek a spektrumnak az értékeit kivontam a hígítási sor elemeiből (27. ábra B és D grafikon).



27. ábra: A *Chlorella vulgaris* mért spektrumai a különböző hígítási szinteken (A: tömény minták korrekció nélkül, a desztillált víz spektruma mellett; B: tömény minták a desztillált vízzel történő korrekciót követően; C: híg minták korrekció nélkül, a desztillált víz spektruma mellett; D: híg minták a desztillált vízzel történő korrekciót követően)

Jól látható, hogy a desztillált víz 300 nm alatt okoz egy erős elnyelési jelenséget, ami gyakorlatilag az ultraviola (UV) sugárzás B és C tartománya (UV-A: 315–400 nm, UV-B: 280–315 nm, UV-C: 200–280 nm). A víz ezen tulajdonsága tette lehetővé, hogy a vízben pár centiméteres mélységben már megjelenhetett az élet (COCKELL 1998). 970 nm környékén egy másik jellemző csúcsot is megfigyelhetünk (27. ábra A és C grafikon), ami a vízre jellemző csúcs, és Chung és munkatársai (2010) szerint ez a csúcs a víz hőmérsékletének

növekedésével egyre intenzívebbé válik és egyre inkább eltolódik az alacsonyabb hullámhossztartomány felé. A víz spektruma ezeken kívül még 380 nm környékén is mutat egy lokális maximumot. A korrigált spektrumok grafikonjain jól látható, hogy a korrekciós eljárást követően mindhárom csúcs eltűnt (27. ábra B és D grafikon, 28. ábra). A vízhatás kiszűrése után megállapítható, hogy a *C. vulgaris* spektruma 3 jellemző csúcsot ad ki, amelyeknek 440, 480 és 680 nm környékén vannak lokális maximum értékei.



28. ábra: A *Chlorella vulgaris* korrigált spektrumai háromdimenziós képen a 300-800 nm tartományban

Ha ezeket összevetjük a szakirodalomban található, zöld algákra jellemző pigmentek abszorbancia spektrumaival, kézenfekvőnek tűnhet, hogy a 440 és 680 nm-es hullámhossz a klorofill-a, a 480 nm-es pedig a klorofill-b pigmentek csúcsainak felelnek meg, míg a 400 és 500 nm-en elhúzódó plató a két klorofill, valamint a karotinoid pigmentek együttes hatásával magyarázható (12. ábra).

Az egyes hígítások vízzel korrigált spektrumaihoz tartozó átlagértékek maximumait a vizsgált 400-1100 nm-es tartományban a 18. táblázat mutatja be. A 400 nm alatti értékek kizárását az indokolta, hogy az UV-tartomány korrekciója ellenére ebben a tartományban a spektrumok pigmentekkel nem magyarázható platót mutattak (28. ábra). Figyelemre méltó, hogy a 10 mintából 8 esetében 442 nm-en volt megfigyelhető a legnagyobb fényintenzitás csökkenés.

18. táblázat: A felvett spektrumok maximumértékei az egyes hígítások esetében

Hígítás	1x	2x	5x	10x	20x	50x	100x	200x	500x	1000x
OD _{max}	2,929	1,973	0,983	0,515	0,285	0,117	0,060	0,034	0,015	0,007
OD _{max} hullámhossza	442	440	442	446	442	442	442	442	442	442

4.2 A különböző biomassza meghatározási módszerek közötti feltárt korrelációk

Az algakoncentrációt jellemző paraméterek meghatározása során nyert eredmények összehasonlítása során az adatsorokat (13. táblázat) egymással szemben korreláltattam, hogy feltárjam az egyes paraméterek közötti összefüggések erősségét (19. 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.

19. 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

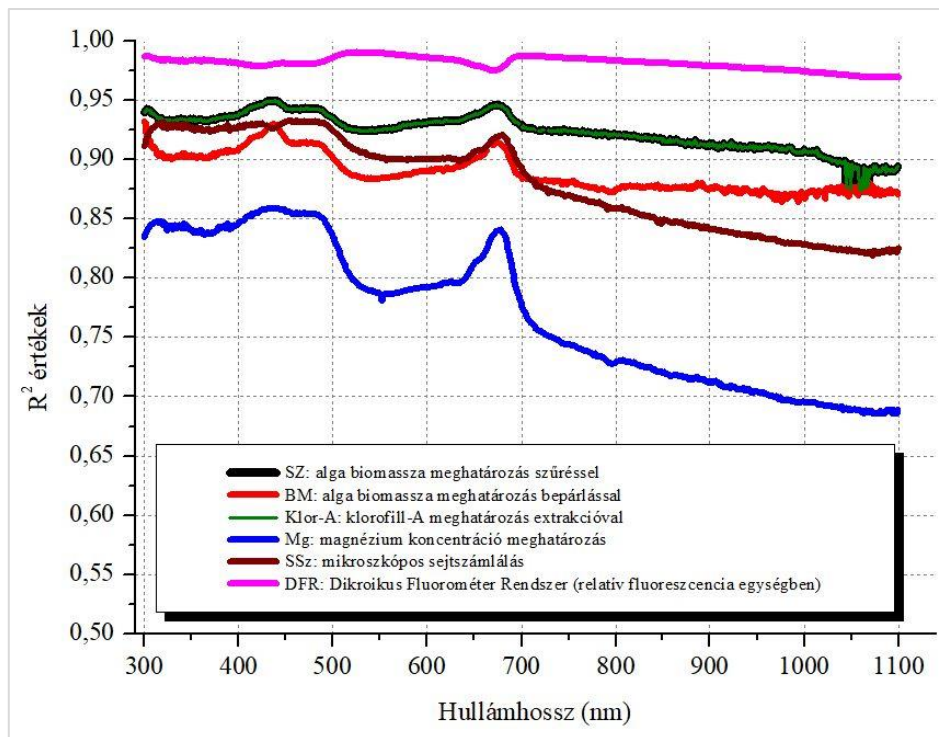
Az egyetlen gyenge összefüggés a fluoreszcens mérés és a magnézium-tartalom meghatározás eredményei között állt elő ($R^2 = 0,816$). A kiemelkedően magas korrelációs értékeket ($R^2 > 0,990$) félkövérrel szedett számokkal emeltem ki. A táblázat nem tartalmazza a spektroszkópiás elemzést, mivel az ezzel a paraméterrel kapott összefüggéseket a teljes spektrumon vizsgáltam, minden egyes hullámhosszon, továbbá a kapott eredményeket külön fejezetben tárgyalom (4.2.1. fejezet).

4.2.1. 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 fókuszja 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 biomasszatömegre 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 (28. ábra). 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. 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 csúcserőértékei is voltak (29. ábra). Egyetlen kivétel a fluoreszcencia értékeknél volt megfigyelhető, ahol nagyjából ennek az ellenkezője figyelhető meg. Az eredetileg fekete színnel jelölt, szűrővel meghatározott biomassza értékek teljes takarásban vannak jelen a grafikonon, ugyanis ez az adatsor rendkívül erős korrelációt mutatott a zöld színnel jelölt klorofill-a koncentrációs adatokkal (lásd 5.1.2. fejezet). Az optikai sűrűség és a további algabiomasszázt becselő paraméterek között meghatározott maximális korrelációs értékeket a látható hullámhossz-tartományban (400–800 nm) a 20. 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.



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

A biomasszamérési 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 biomasszabecslés összefüggésének megállapítására.

20. 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

4.2.2. Az algabiomassza becslésére ajánlott képlet

A megfelelő hullámhossz kiválasztása után a korrelációt tovább pontosítottam az *Origin* szoftver különböző beépített függvényeinek tesztelésével. A hígítási sorozat mentén mért biomassza-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 alkalmaztam (HAGEMANN *et al.* 2018), amely függvény megegyezik a pigmentek meghatározása során fellépő fényelnyelési hatást leíró és jól ismert Bouguer–Lambert–Beer törvénnyel [1] (YEH *et al.* 2023).

$$A = \varepsilon \ell c \quad [1]$$

ahol:

- A: abszorpciós együttható
- ε : elnyelő közeg moláris abszorpciós együtthatója
- ℓ : a fény által az anyagban megtett távolság
- c: az abszorbeáló részecskék koncentrációja

Ugyanakkor az abszorbancia egyenlete [2] az alábbi módon írható le:

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [2]$$

ahol I_0 és I a beeső, illetve az anyagon áthaladt fény intenzitása vagy energiája

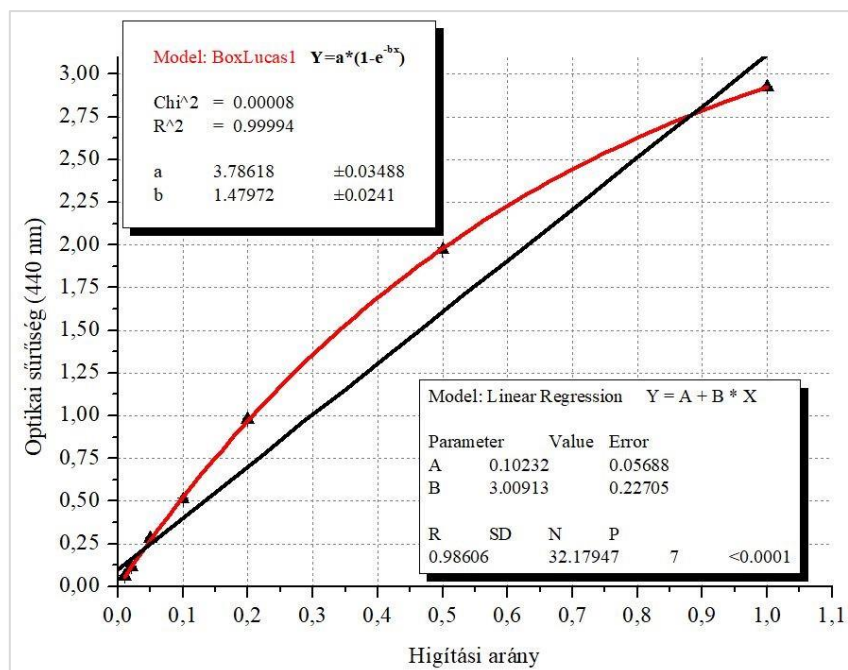
Az alkalmazott Box–Lucas-féle inverz exponenciális függvény [3] a következő:

$$y = a (1 - e^{-bx}) \quad [3]$$

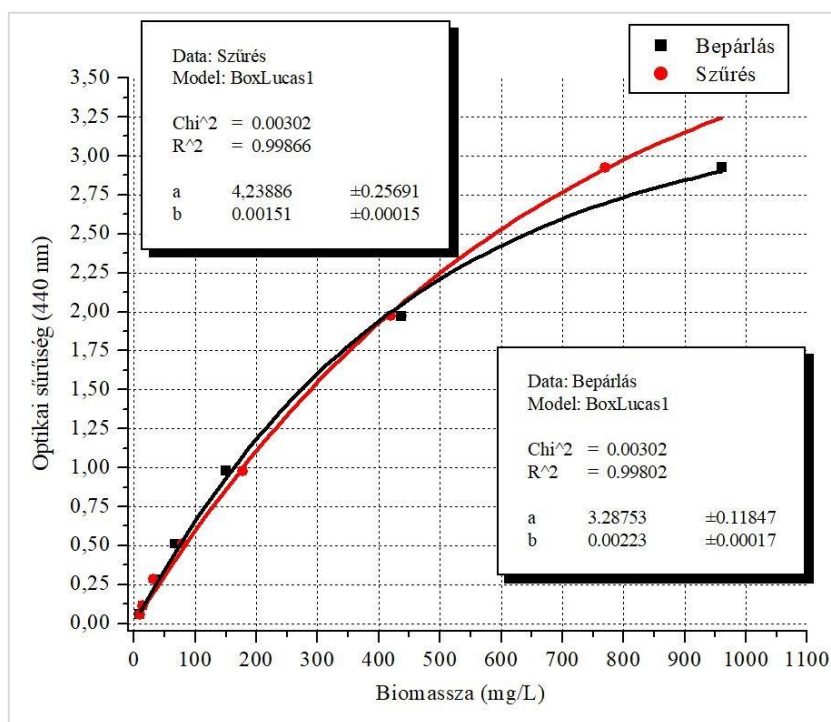
ahol a és b állandók, x és y a függvény változói

A modell fényelnyelésre vonatkoztatott behelyettesítése a [15] egyenleten látható.

Ahogy az a 30. ábrán látható, az exponenciális függvény szignifikánsan magasabb determinációs együtthatót eredményezett ($R^2 = 0,9989$), mint a lineáris modell ($R^2 = 0,9879$). A grafikonon a 440-es hullámhosszon mért optikai sűrűség értékeket korreláltattam a hígítási arány értékeivel, amely a legpontosabban írja le az algák egymáshoz képest mutatókozó mennyiségét, ez azonban nem egy mért, hanem egy teoretikus érték. Ha a kiválasztott függvényt és hullámhosszt a hígítási arány helyett a biomassza adatsorokkal vetjük össze (31. ábra), akkor a kapott egyenlet lehet az univerzálisan használható átváltás alapja.



30. ábra: A lineáris és a Box–Lucas egyenletekkel illesztett függvények pontosságának összehasonlítása a hígítási arány és a 440 nm-es csúcsnál mért optikai sűrűség eredményei között (piros vonal: a pontokra illesztett Box–Lucas függvény; fekete vonal: az adatsorra illesztett lineáris függvény)



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

A függvények illesztésének pontosságát jelző R^2 -értékek nem térnek el szignifikánsan egymástól, így a döntéshozatal során a két laboratóriumi biomassza

koncentráció meghatározási módszer közötti egyéb tulajdonságok alapján kell dönteni. A szűrés műveletében rejlő esetleges pontatlanságok és amiatt, mert a bepárlási maradék módszernél maradéktalanul ki lett küszöbölve az oldatban levő sók esetleges bemérése az algával együtt, ez utóbbi lett kiválasztva és az alábbi egyenlettel [4] írható le az összefüggés:

$$C_{\text{algiabiomassza}} \text{ mg / L (sz.a.)} = \ln(1 - OD_{440 \text{ nm}} / 3,29) / (-0,0022) \quad [4]$$

4.2.3. Az exponenciális függvény alkalmazásának matematikai alapjai

Az optikai sűrűség és az algakoncentráció adatsorai közötti korreláció jellemzésére a Bouguer–Lambert–Beer törvény egyenletét alkalmaztam, amely törvény kimondja, hogy a részecskék közötti fényelnyelés esetén az áthaladó fény intenzitása nem egyenes arányban csökken az elnyelő részecskék számával, mivel abban az egyes algasejtek a fényelnyelésük során egyúttal a takarásban elhelyezkedő algasejtekre jutó fénymennyiséget is csökkentik. A jelenség elméleti háttere a következőképpen magyarázható. Tegyük fel, hogy a küvettában a vizes fázis mellett szilárd részecskeként kizárólag algasejtek találhatók, amelyek egymással fedésben helyezkednek el és teljesen takarják egymást. Ebben az esetben az algakoncentráció eléri a maximális értéket (C_{max}), az ehhez a koncentrációhoz tartozó maximálisan mérhető fényelnyelés legyen F_{max} . Ez nem feltétlenül jelent teljes sötétséget (kb. 3–4 egység, az alkalmazott műszertől függően), mivel az algasejtek nem nyelik el az összes fényt. Ugyanakkor biztosak lehetünk abban, hogy a sejtek teljes mértékben árnyékolják egymást. Ebből felismerhető, hogy az egyes algasejtek fényelnyelő képessége arányos a koncentrációval (LÓPEZ-HERNÁNDEZ *et al.* 2022). Tehát minél nagyobb a koncentráció, annál kisebb hatással van az újonnan hozzáadott algasejtek jelenléte az fényelnyelés alakulására. A maximális koncentráció közelében ez a hatás elhanyagolhatóvá válik, mivel az újonnan hozzáadott algasejteket lényegében a már jelenlévő sejtek árnyékolják, így nem járulnak hozzá további fény elnyeléséhez. Mindezt differenciálegyenlettel [5] felírva, a fényelnyelés csökkenése a koncentráció függvényében arányos a maximális fényelnyeléstől mérhető eltéréssel:

$$\frac{dF}{dc} = -k \cdot (F_{\text{max}} - F) \quad [5]$$

ahol F : az fényelnyelés (-)

F_{max} : az adott algára jellemző maximális fényelnyelés (-)

c : az algakoncentráció (mg/dm^3)

k : az adott algára jellemző fényelnyelési állandó (-)

Az egyenletbe vezessük be a $B = F_{\max} - F$ változót. [6]

Mivel egy konstans hozzáadása vagy levonása nem befolyásolja egy érték megváltozását, a következő összefüggést írhatjuk fel $dA = dB$, behelyettesítve az [5] egyenletbe:

$$\frac{dB}{dc} = -k \cdot B \quad [7]$$

Az egyenlet átrendezését követően következő összefüggést kapjuk:

$$\frac{dB}{B} = -k \cdot dc \quad [8]$$

A szétválasztható differenciálegyenlet az ismert megoldással a következőképpen írható le:

$$\ln(B) = -k \cdot c + \ln(K) \quad [9]$$

ahol K : az integrációs konstans

Az egyenlet átrendezését követően következő összefüggést kapjuk:

$$B = K \cdot e^{-k \cdot c} \quad [10]$$

Nézzük az integrációs konstans: kezdeti feltétel $c = 0$, $F = 0$ (tisztá víz),

vagyis a kezdeti B változó: $B_0 = F_{\max}$, [11]

ebből következik, hogy $K = F_{\max}$, (mivel a nulla exponense egy) [12]

Behelyettesítve [10]-be: $B = F_{\max} \cdot e^{-k \cdot c}$ és $F = F_{\max} - B$ [13]

F -re kifejezve: $F = F_{\max} - F_{\max} \cdot e^{-k \cdot c}$ [14]

Átrendezve: $F = F_{\max} (1 - e^{-k \cdot c})$ [15]

A specifikus fényelnyelési együttható (vagy fitoplankton-abszorpciós együttható) becsléséhez az adott algafaj *in situ* pigmenteloszlási jellemzőit és a súllyspecifikus, *in vivo* elnyelési tulajdonságait tartalmazó adatokat használhatjuk. Az utóbbi paraméterek a tiszta pigmentstandardok abszorpciós tulajdonságainak spektrofotometriás mérésével nyerhetők ki, majd az abszorpciós maximumok *in vivo* körülményeihez igazításával pontosíthatók (BIDIGARE *et al.* 1990, NGUY-ROBERTSON *et al.* 2013, TEKINER *et al.* 2018, CLEMENTSON és WOJTASIEWICZ 2019).

4.3 A *C. vulgaris* mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményei

A *C. vulgaris* mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeit a 21. táblázat foglalja össze. A fajlagos növekedés az alábbi képlet [16] szerint lett meghatározva (ALGAE RESEARCH AND SUPPLY 2024):

$$\mu = \ln(N_2/N_1)/(t_2 - t_1) \quad [16]$$

ahol, μ	fajlagos növekedés
N_1	algabiomassza-koncentráció a kiindulási időpontban (mg/L)
N_2	algabiomassza-koncentráció a végső időpontban (mg/L)
t_2-t_1	mérési időintervallum (nap)

A duplázódási idő a következő képlet [17] alapján került kiszámításra (ALGAE RESEARCH AND SUPPLY 2024):

$$td = \ln(2/\mu) \quad [17]$$

ahol, td	duplázódási idő (nap)
μ	fajlagos növekedés (1/nap)

21. 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
végző 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
végző 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 szerves 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 végző érték között ($p \leq 0,05$)

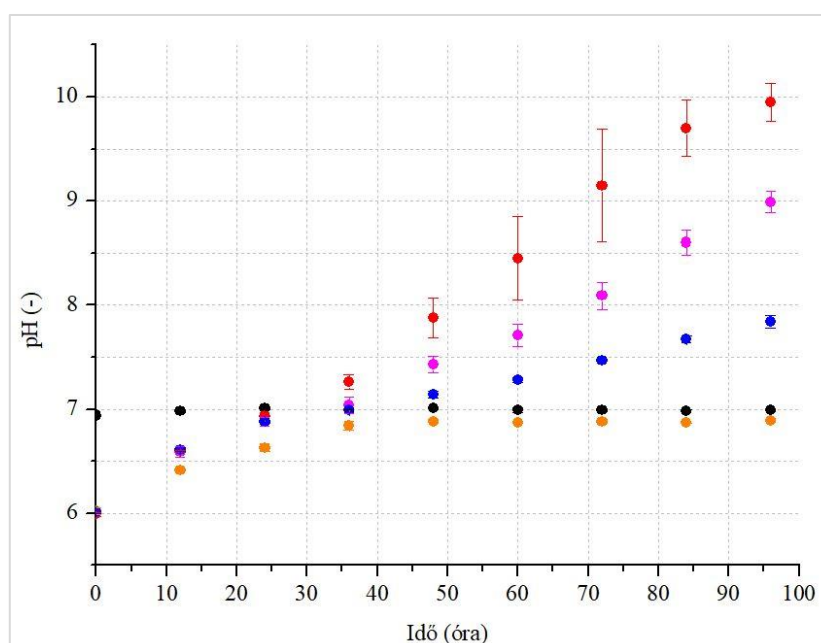
A WBA-kezelések eredményeinek statisztikai elemzése szerint a kontrollhoz képest magasabb végső algakoncentrációkat, biomassa-változást és fajlagos növekedési rátákat figyeltem meg ($p \leq 0,038$). A legmagasabb végső algakoncentrációt, biomassa-változást és fajlagos növekedési rátákat a 10%-os és 25%-os WBA-kezelések esetén határoztam meg a kontroll csoporthoz képest ($p < 0,001$). 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 ($p < 0,050$). 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 ($p \leq 0,003$). 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 (21. táblázat). Összegezve tehát a vizsgált paraméterek eredményeit, a 10%-os WBA-kezelés tekinthető a optimálisnak az algák növekedése, szénfelvétele és a hamu kivonat, mint lúgos CO₂ elnyelő közeg regenerációs képessége szempontjából.

4.3.1 A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során tapasztalt pH változások

A *C. vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során tapasztalt pH változásokat a különböző kezeléseket követően a 22. táblázat foglalja össze. A táblázatban a pH-értékek átlagai vannak feltüntetve a szórások megjelenítése mellett. A kísérlet során alkalmazott kezelések esetében az ismétlések részletes adatai a 8. számú mellékletben (M8) találhatóak meg. A kísérleteink során az alkalmazott termesztőközegek eredetileg lúgosak voltak a hamu kivonat hozzáadása miatt. Azon kezeléseket, amelyekben magasabb volt az alkalmazott WBA kivonat aránya, jóval magasabb pH érték volt megfigyelhető a CO₂ diffúzió előtt. A lúgosabbá vált közeg így több CO₂-ot volt képes megkötni. A legmagasabb végső pH-értéket a 10%-os WBA-kezelés esetében figyeltem meg (32. ábra).

22. táblázat: A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során alkalmazott kezelések esetében tapasztalt pH-változások

Idő (h)	kontroll	0% WBA	10% WBA	25% WBA	50% WBA
CO ₂ előtt	6,94±0,01	6,79±0,01	9,67±0,20	11,18±0,06	12,15±0,04
0	6,94±0,01	6,02±0,03	5,99±0,02	6,01±0,01	6,01±0,01
12	6,98±0,01	6,41±0,02	6,59±0,01	6,59±0,05	6,61±0,02
24	7,01±0,01	6,63±0,04	6,93±0,01	6,88±0,04	6,88±0,02
36	6,99±0,01	6,84±0,04	7,26±0,07	7,04±0,08	6,99±0,02
48	7,01±0,01	6,88±0,02	7,88±0,19	7,43±0,08	7,14±0,03
60	6,99±0,02	6,87±0,01	8,45±0,40	7,71±0,11	7,28±0,02
72	6,99±0,01	6,88±0,02	9,15±0,54	8,09±0,13	7,47±0,01
84	6,98±0,01	6,87±0,01	9,70±0,27	8,60±0,12	7,67±0,03
96	6,99±0,01	6,89±0,02	9,95±0,18	8,99±0,10	7,84±0,06



32. ábra: A pH-értékek átlagának változása a különböző WBA-kezelések hatására (fekete: kontroll kezelés WBA és CO₂ diffúzió nélkül; narancs: 0%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; piros: 10%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; lila: 25%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; kék: 50%-os WBA kezelés CO₂ diffúzióval)

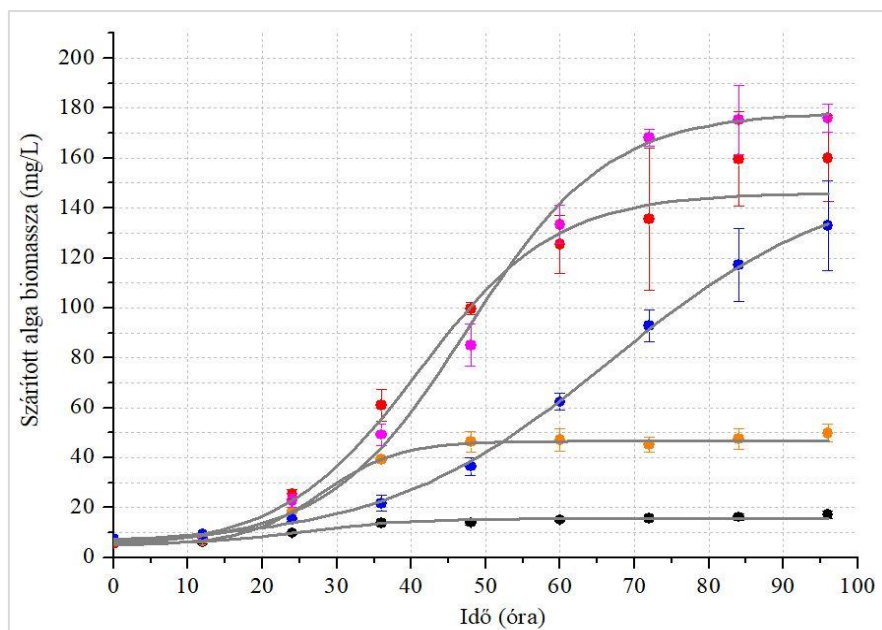
4.3.2 A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során tapasztalt algabiomassza változások

Az algabiomassza koncentrációjában tapasztalt változását a különböző kezelések hatására a 23. táblázat foglalja össze. A táblázatban az algasejt-koncentrációk átlagai vannak feltüntetve a szórások megjelenítése mellett. A kísérlet során alkalmazott kezelések esetében az ismétlések részletes adatai a 9. számú mellékletben (M9) található meg. A különböző kezelések esetében meghatározott biomasszaadatok átlagértékeire szigmoid görbéket illesztettem ($R^2 \geq 0,992$), amelyeket a 33. ábra szemléltet. Az illesztett szigmoid görbék egyes matematikai paramétereit a

24. táblázat foglalja össze. A függvények elemzése lehetővé tette az adott körülmények között meghatározható elméletileg előállítható maximális biomassa (A_2), valamint a növekedéshez szükséges idő (dx) kiszámítását (24. táblázat). Megállapítható, hogy a maximális biomassa a 25%-os WBA kezelésben volt a legnagyobb (176 mg/L sz.a.), míg a növekedéshez szükséges idő a 10%-os WBA kezelésnél volt a legkedvezőbb.

23. táblázat: A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során meghatározott algabiomassa koncentráció változások az alkalmazott kezelések esetében

Idő (h)	kontroll	0% WBA	10% WBA	25% WBA	50% WBA
0	5,6±0,5	5,5±0,6	5,5±0,4	6,5±0,4	7,5±0,3
12	6,2±0,6	6,6±0,4	7,9±0,8	8,8±0,1	9,3±0,1
24	9,8±0,4	18,4±0,4	25,4±1,9	22,8±2,5	15,2±0,7
36	13,8±0,6	39,3±0,3	61,0±6,3	49,2±4,3	21,7±3,2
48	13,9±0,9	46,3±4,2	99,6±2,4	85,1±8,4	36,4±3,6
60	15,1±0,7	47,2±4,5	125,4±11,5	133,4±7,6	62,3±3,4
72	15,7±0,3	45,3±2,9	135,6±28,5	168,2±3,3	92,8±6,3
84	16,2±1,2	47,4±4,0	159,6±19,0	175,3±13,8	117,1±14,6
96	17,1±1,5	49,8±3,6	160,0±17,2	176,0±5,6	133,0±18,0



33. ábra: Az algabiomassa növekedése a különböző WBA-kezelések esetében (fekete: kontroll kezelés WBA és CO₂ diffúzió nélkül; narancs: 0%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; piros: 10%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; lila: 25%-os WBA kezelés CO₂- diffúzióval; kék: 50%-os WBA kezelés CO₂ diffúzióval)

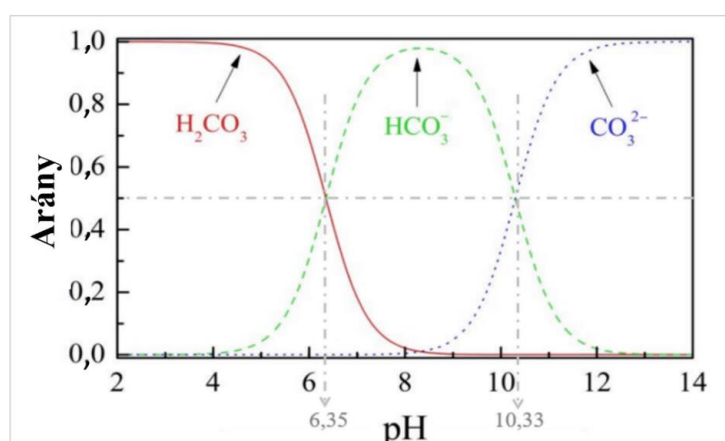
24. táblázat: A különböző kezelések esetében meghatározott biomassza növekedésre illesztett szigmoid görbék matematikai paraméterei

Kezelés	Chi ²	R ²	A ₁	A ₂	x ₀	dx
kontroll	0,832	0,992	5,2	15,6	25,8	7,1
0% WBA	0,359	1,000	4,9	46,6	27,9	5,2
10% WBA	1,621	0,996	3,6	146,0	41,0	9,2
25% WBA	1,778	0,998	5,0	178,3	47,6	9,4
50% WBA	1,126	0,992	5,4	152,5	66,8	15,3

Megj.: Chi²: folytonos valószínűségi eloszlás (continuous probability distribution); R²: a görbe illesztés pontossága; A₁: elméleti minimális (aszimptotikus) kezdeti biomassza tömeg; A₂: elméleti maximális (aszimptotikus) végső biomassza tömeg; x₀: a görbe legmeredekebb pontja (ebben az időpontban a leggyorsabb növekedés üteme); dx: a görbe meredeksége (a maximális növekedés eléréséhez szükséges idő)

4.3.3 A *Chlorella vulgaris* szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet során meghatározott változások az oldott szervetlen széntartalomban

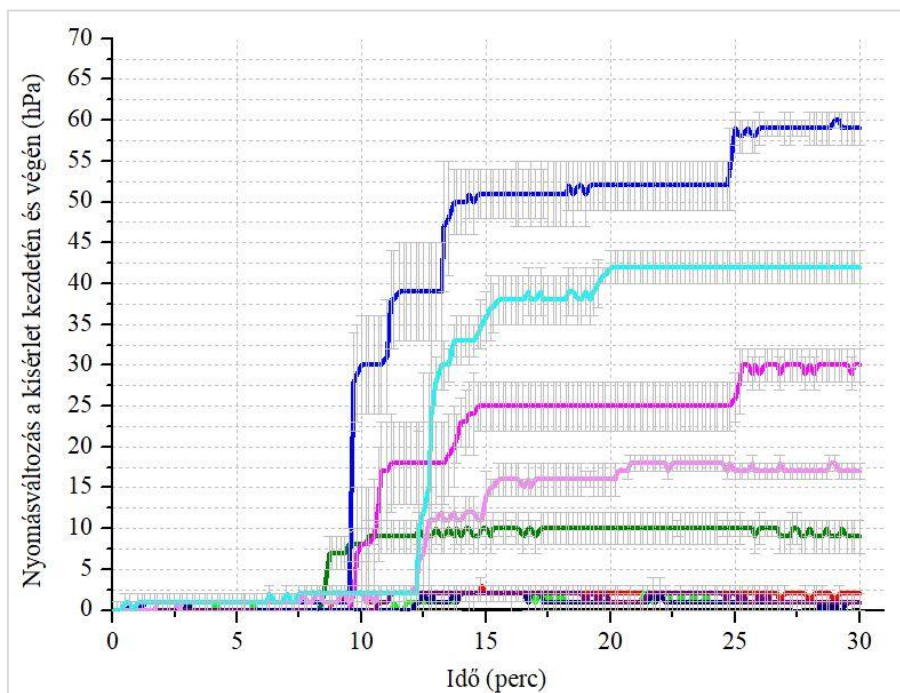
A modellkísérlet összeállításakor minden mintából dupla adagot állítottam elő, amelyet a CO₂ diffúziót követően megfelezttem. Az egyik feléből 200-200 mL rögtön az OxiTop készülékekbe került, amiben az oldott DIC-tartalmat úgy állapítottam meg, hogy sósav segítségével kihajtottam a szuszpenzió CO₂-tartalmát miközben folyamatosan monitoroztam a nyomás változását. A keletkező gáz okozta többlet nyomást úgy tudtam meghatározni, hogy kb. 10 percen keresztül csak az alapjelet mértem az edényekben, majd ezt követően a minták mellé helyezett főzőpoharat megdöntve annak sósav tartalma kiömlött és elsavanyította a közeget, így az már nem volt képes oldatban tartani annak CO₂ tartalmát, amint ez a karbonátformák pH viszonyokkal való összefüggését bemutató 34. ábrán is jól látható.



34. ábra: A karbonátformák pH-függése (PEREZ *et al.* 2024, PISMENSKAYA *et al.* 2001)

Az így az oldatból kihajtott CO₂ gáz többlet nyomást okozott a zárt edényben, amit az Oxitop készülék képes mérni és eltárolni. A készülék által mért nyomásértékek átlagos

eredményeit a szórások feltüntetése mellett a 35. ábra mutatja be. Az *OxiTop* készülék által mért nyomásadatokat a 10. számú mellékletben (M10) foglaltam össze. Az eredmények kiszámítása során a végső nyomásértékeknek azt a stabil, állandósult nyomást vettem, ami a görbék végén a maximumnál kialakult, majd ezeket az adatok tovább korrigáltam az alapjellel, tehát azt mintegy vaknak véve, ezeket a nyomásértékekét kivontam a végső értékekből.

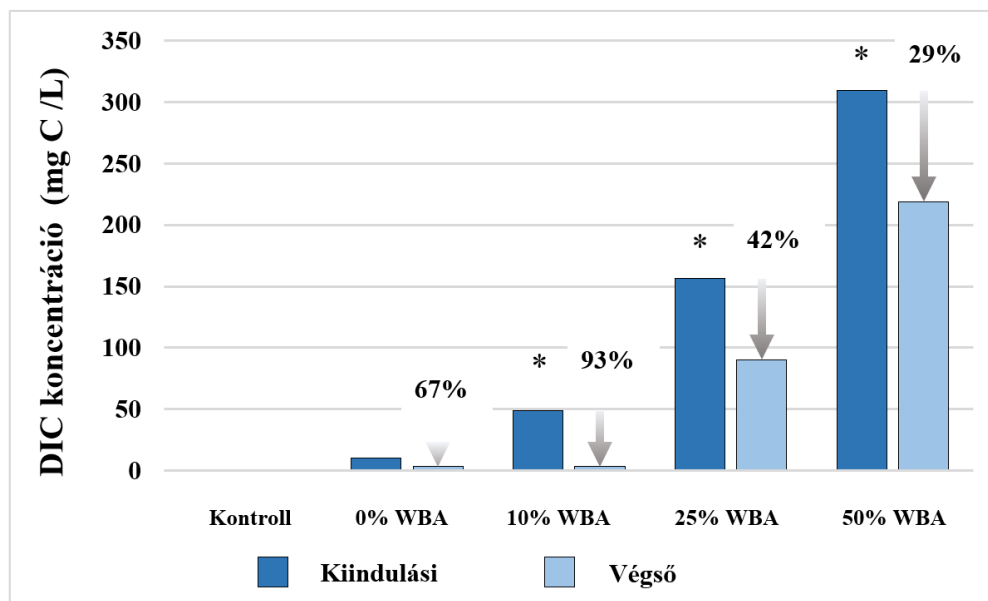


35. ábra: A kontroll és kezelt mintákban mért nyomásértékek savkezelés előtt (10. perc körül) és után az alga növekedési modellkísérlet folyamán (fekete: alga kísérlet előtti kontroll minta; sötétszürke: alga kísérlet utáni kontroll minta; piros: 0%-os WBA-kezelés a kísérlet kezdetén; lila: 0%-os WBA-kezelés a kísérlet végén; olíva: 10%-os WBA-kezelés a kísérlet kezdetén; zöld: 10%-os WBA-kezelés a kísérlet végén; bíbor: 25%-os WBA-kezelés a kísérlet kezdetén; világos bíbor: 25%-os WBA-kezelés a kísérlet végén; kék: 50%-os WBA-kezelés a kísérlet kezdetén; világoskék: 50%-os WBA-kezelés a kísérlet végén)

A felszabadult CO_2 mennyiségének kiszámításához az egyetemes gáztörvényt használtam fel, figyelembe véve a palackok minta térfogattal korrigált légtérfogatát és az állandó 20 °C-os hőmérsékletet. A nyomásértékekből számolt *DIC*-tartalom változását a kezeléseket követően a 10. számú mellékletben (M10) találhatóak. A várakozásoknak megfelelően a WBA-t nagyobb arányban tartalmazó kezelések esetében magasabb *DIC*-értékeket mértem, amely látszólagos összefüggést lineáris regresszióval leellenőriztem és erős korrelációt tapasztaltam ($R^2 = 0,9791$).

A modellkísérlet előtt és után mért *DIC*-értékeket a 36. ábrán ábrázoltam, a *DIC*-tartalom eltávolításának %-os hatásfokát is feltüntetve az ábrán. Feltételezve, hogy a detektált szénfogyás az algákban hasznosult, a magas hatásfok a kezelés hatékonyságát jelzi. A mért *DIC*-értékek alapján a 10%-os WBA-kezelés bizonyult a leghatékonyabbnak, mivel az oldott szén 93%-a

elfogyott, ami arra utal, hogy ebben a kezelésben az algák gyakorlatilag teljesen regenerálták a lúgos CO₂-megkötő közeget.



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

Az eredmények alapján javasolt, algaalapú rendszer egy elválasztott szén-megkötési módszert alkalmaz, ami azt jelenti, hogy a CO₂ megkötése és az oldat regenerálása elkülönülten zajlik, amint azt a 14. ábra is szemlélteti. Ennek következtében nincs közvetlen CO₂-gáz bevezetés az algatermesztési térbe. Az algáknak azonban képesnek kell lenniük életben maradni egy magas CO₂-koncentrációjú, valamint lúgos és savanyú kémhatású közegben is, mivel a mosóoldat karbonáttartalma igen magas és a hamuból kioldódó vegyületeknek köszönhetően alapvetően bázikus jellegű. Tekintettel arra, hogy a WBA káliumtartalma magas, a modellkísérletekben lezajló reakciók leírásánál modell vegyületként alkalmazható. A mérési eredményeink alapján, káliummal modellezve az alábbi reakcióegyenletek szerint vázolható fel a lezajlott folyamatok kémiai háttere:

1. CO₂ megkötése kálium-oxiddal (K₂O): Az égés során keletkező K₂O megkötheti a légköri CO₂-t, bár ezt a folyamatot korlátozza a nedvességtartalom. Ugyanakkor az oxidok nagy higroszkóposága miatt képesek megkötni a levegő páratartalmát is, ami azonban a jelen kísérlet során nem következhetett be, mivel a hamut légmentes tárolóba helyeztem a mintázás után annak szobahőmérsékletre való lehűlése előtt:



2. Kálium-hidroxid (KOH) képződése: Amikor frissen forralt desztillált vizet adunk a hamuhoz, KOH keletkezik:



3. CO₂ megkötése hidroxiddal: A kálium-hidroxid körülbelül pH ~9-ig képes CO₂-t megkötni (34. ábra), miközben kálium-karbonát (K₂CO₃) keletkezik:



4. További CO₂ megkötése karbonáttal: A vizes oldatban lévő kálium-karbonát (K₂CO₃) további CO₂-t képes megkötni, amíg a pH körülbelül 6-ra csökken (34. ábra):



5. Algák CO₂-felvétele bikarbonátból: Az algák bevezetésekor a bikarbonátból (KHCO₃) veszik fel a CO₂-t, ezzel az algák képesek voltak a kiindulási lúgosság egy részének regenerálására, egészen pH 9-10-ig:



A füstgázmosó oldat eredeti lúgosságának helyreállításához a kálium-karbonátot tovább kellene bontaniuk az algáknak kálium-hidroxidra:



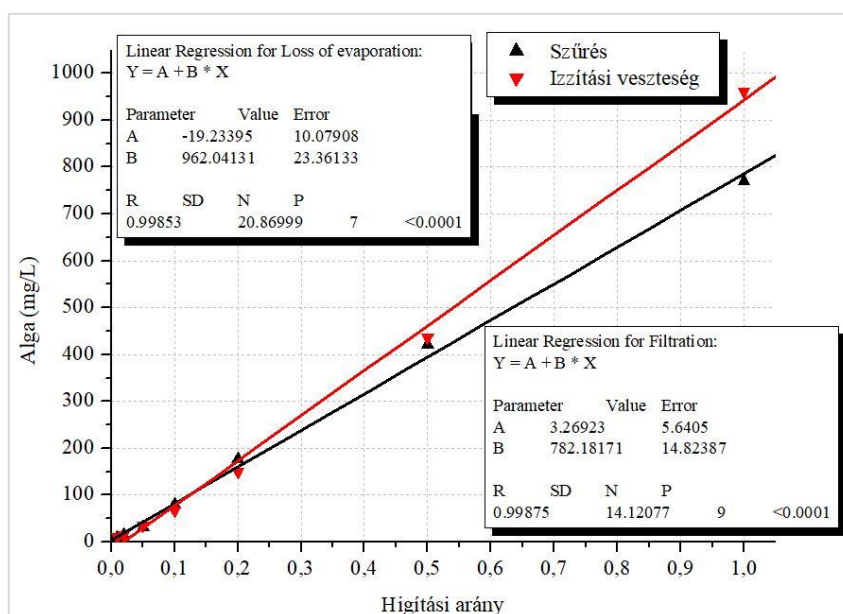
A mérési eredményeim alapján azonban azt állapítottam meg, hogy 10-es pH érték fölé nem mentek a minták, feltételezhetően azért, mert ebben a lúgos közegben az algák nem képesek növekedni, így csak a mosóoldat részleges regenerációjára képesek. Emiatt is számít a legkedvezőbb kezelésnek a 10%-os WBA kivonatot tartalmazó kezelés, amelynek kiindulási pH-ja eleve a 10-es érték alatt volt, így azt a mosóoldatot teljes mértékben regenerálni tudták az algasejtek.

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

5.1 A különböző biomassza meghatározási módszerek eredményeiből levont következtetések

5.1.1 A szűrésen és bepárlási maradékon alapuló biomassza meghatározás

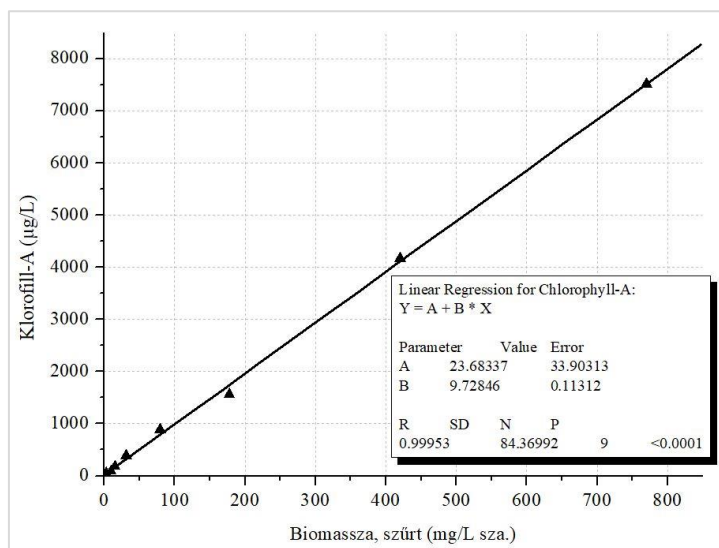
A legtöményebb minta esetében megfigyelt jelentős, közel 20%-os különbség ellenére nagyon hasonló eredményeket érhetünk el, függetlenül attól, hogy a szűrésen vagy a bepárlási maradékon alapuló módszert alkalmazzuk. A szűréssel meghatározott biomassza és a hígítási arányok közötti lineáris regresszió alapján kapott R^2 -érték 0,99875 volt. A bepárlási maradék módszer esetében elvégzett lineáris regresszió determinációs együtthatója 0,99853 (37. ábra).



37. ábra: A hígítási arány korrelációja a szűrésen (fekete pontok és vonal) és a bepárlási maradékon alapuló módszer (piros pontok és vonal) eredményei között

5.1.2 A szűrésen és a klorofill-a-tartalom meghatározásán alapuló biomassza meghatározás

A szűrésen és a klorofill-a-tartalom meghatározásán alapuló biomassza meghatározás eredményei között kiemelkedően magas korrelációt figyeltem meg ($R^2 = 0,99953$) (38. ábra). A korrelációs szkennelés során is szinte azonos görbéket kaptam (29. ábra). A megfigyelt összefüggés valószínűleg a Felföldy-módszerben alkalmazott szűrési műveletnek köszönhető, amely mindkét mérés esetében hasonló hibákat eredményezett.



38. ábra: A szűrésen és a klorofill-a-tartalom meghatározásán alapuló biomassza meghatározás eredményei közötti erős korreláció

5.1.3 Az új, automatizált, digitális sejtszámlálási módszer

A mérések során egy gyors és részben automatizált módszert fejlesztettem ki az algasejtek megszámlálásához az *ImageJ* szoftver pixel-számláló funkciójának segítségével. Az eljárás részletes lépéseit a 3.2.5. fejezetben ismertettem. Az új módszerrel kapott eredmények pontosságát a 5.1.4. fejezetben igazoltam.

5.1.4 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 (25. táblázat).

25. 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 $22,4 \mu\text{g}$ ($2,24 \pm 0,16 \times 10^{-11} \text{ g/sejt}$) (HU 2014), 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 (26. táblázat).

26. táblázat: A *Chlorella vulgaris* magnéziumtartalma más kutatások eredményei alapján

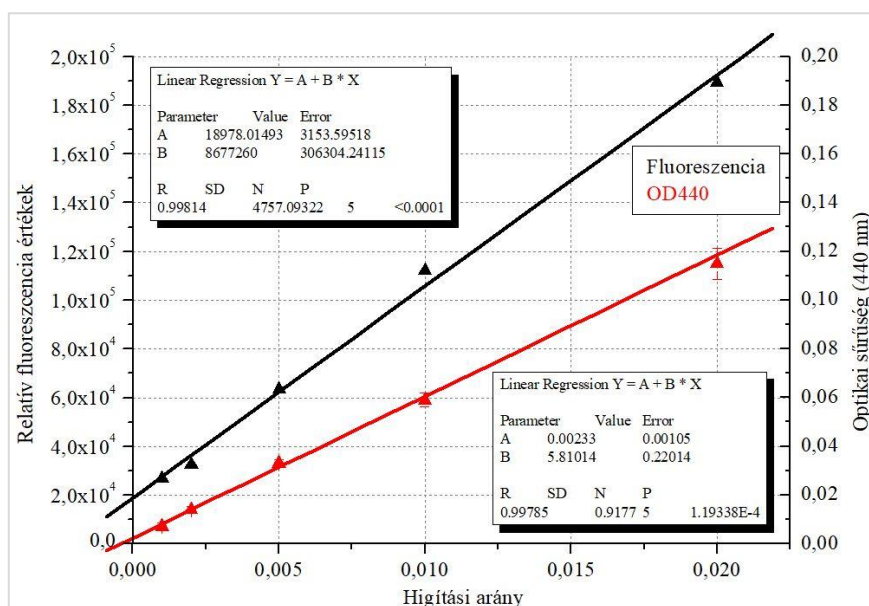
<i>C. vulgaris</i> sejt Mg-tartalma (mg/100 g sz.a.)	Referencia
37,3	PRABAKARAN <i>et al.</i> 2019
344	TOKUŞOĞLU és ÜNAL 2003
360	MARUYAMA <i>et al.</i> 1997
360–800	MANDALAM <i>et al.</i> 1998
440	PANAHI <i>et al.</i> 2012

Mivel az általam meghatározott érték egyetlen szakirodalomban talált értékhez közelít (PRABAKARAN *et al.* 2019), amely kevesebb mint $100 \text{ mg/100 g sz.a.}$ becsült, szükségessé vált az eredményem valamilyen úton történő validálása, így a Felföldy-módszerrel mért klorofill-a-tartalmat összehasonlítottam a klorofill-a-tartalom elméleti, Mg-tartalomból kiszámított értékeivel. A számítás során a mért magnézium értékeket megszoroztam a magnézium moláris atomtömege ($24,3 \text{ g/mol}$) és a klorofill-a moláris molekulatömege ($893,5 \text{ g/mol}$) közötti aránnyal ($36,77$). A hígítatlan minta esetében számított klorofill-a-tartalom értéke ($7521 \mu\text{g/L}$) majdnem megegyezett ($0,066\%$ -os eltéréssel) a mért értékkel ($7516 \mu\text{g/L}$) (14. táblázat). A magnézium mérés pontossága a fenti levezetéssel így igazolva lett, továbbá a 5.1.1. fejezetben a biomasszamérési módszer pontossága is megerősítést nyert azáltal, hogy két, egymástól teljesen független mérési módszerrel is nagyon hasonló végeredményt kaptam. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy az ebből a két adatsorból származtatott *C. vulgaris* szárazanyagra vonatkoztatott Mg-tartalma validnak tekinthető, még ha a szakirodalomban elérhető adatok többsége eltérő adatokat közöl.

5.1.5 *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 biomassza 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 (ISO 2016), így a kevésbé szennyezett minták esetén (víztisztítás) nefelometriás mérés alkalmazható. Az erősen szennyezett, zavaros minták (szennyvíztisztítás) esetén turbidimetriás módszerek alkalmazása ajánlott (ISO 2016, HAVLIK *et al.* 2022).

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 (39. ábra), 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 ($R^2 = 0,98533$) (40. ábra). 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.

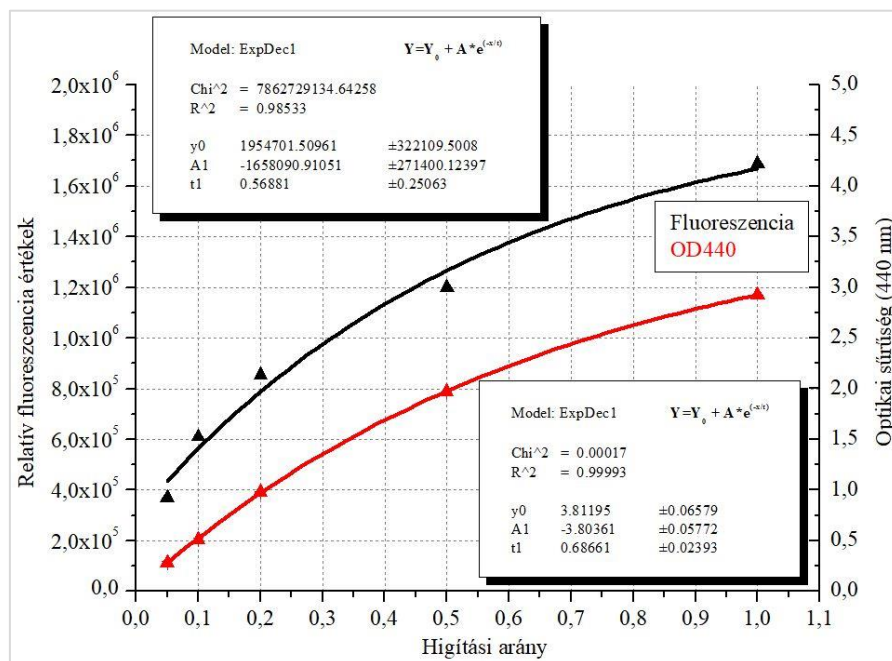


39. ábra: A hígítási arányok korrelációja a 440 nm-en mért optikai sűrűséggel (piros pontok, piros vonal: lineáris regresszió) és a detektált fluoreszcens jel intenzitásával (fekete pontok, fekete vonal: lineáris regresszió) az 5 hígabb algaminta esetében

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. Közvetett módon az is következhetne a hullámhossz kiválasztása alapján, hogy a *C. vulgaris* monokromatikus megvilágítása során ezt a hullámhosszt kell kiválasztani a teljes spektrumból, míg a többi elhagyható annak érdekében, hogy minél inkább energiahatékonnyá váljon az algasejtek termesztése. A megvilágítás algasejtek termelékenységére gyakorolt hatása a szakirodalom alapján egy elég sokat kutatott téma. A legtöbb szerző a fehér vagy a vörös színű megvilágítást ajánlja (BIALON és RATH 2018, TROFIMCHUK *et al.* 2020). Bialon és Rath (2018) eredményei alapján a fehér fény eredményezte a legmagasabb növekedési rátákat, de a maximális fotonhatékonyságot a piros LED-ek alkalmazása mellett érték el.

Tovább árnyalja a képet azonban, hogy bizonyos szerzők tanulmányai alapján a megvilágítás biomaszatömeget érintő hatásai mellett egyéb hatásai is bizonyítottá váltak. Kendirlioglu és Cetin (2017) szerint a *C. vulgaris* esetében a legnagyobb biomasza-növekedés és fehérjemennyiség a vörös fénnel megvilágított mintákon volt tapasztalható, ugyanakkor a legnagyobb mennyiségű klorofill-a és -b pigmenttartalom a zöld fénnel való megvilágítás során volt megfigyelhető, míg az asztaxantin mennyisége a kék fény esetében volt a legjelentősebb mértékű. Egy másik tanulmányban a kék fénnel történő megvilágítás jelentősen megnövelte a sejt méretet, míg a vörös fény kis méretű sejteket eredményezett az aktív osztódás eredményeként (KIM *et al.* 2014). A konszenzus hiányára utal Brahmandam (2024) kísérlete is, amelyben a legnagyobb pozitív biomasza-változást éppen a kék fénynek (400-490 nm) kitett *C. vulgaris*

sejtekben, majd a vörös (630-650 nm) és a zöld (510-530 nm) fénynek kitett sejtekben figyelték meg. A vörös fénynek kitett *C. vulgaris* sejtek méretében itt is szignifikáns csökkent tapasztaltak. Összegezve tehát a szakirodalom jelenleg nem mutat egységes képet a megvilágítást illetően, így a feltételezéseket mérésekkel kell igazolni.



40. ábra: A hígítási arányok korrelációja a 440 nm-en mért optikai sűrűséggel (piros pontok, piros vonal: exponenciális regresszió) és a detektált fluoreszcens jel intenzitásával (fekete pontok, fekete vonal: exponenciális regresszió) az 5 töményebb algaminta esetén

Az a tény, hogy a klorofill-a a kék fény tartományában mutatta a leginkább jellemző elnyelést, annak ellenére, hogy közismerten zöld színe van, amit a vörösben való elnyelésnek köszönhet, egy további sejtésre enged következtetni. A kék fény elnyelése egy nagyon ősi fotoszintetikus tulajdonság, amelyet minden alga csoport őriz (REHM *et al.* 2018), aminek az elsődleges magyarázata a Föld korai szakaszában tapasztalható erős UV-sugárzás. Az élőlények számára csak a mélyebben fekvő vizek nyújtottak megfelelő védelmet, azonban ott egyúttal a látható fény spektrum jelentős része is elnyelődik a vízben, kivéve a rövid hullámhosszú kék- és ibolyaszíneket. Napjainkban az algák mélység és pigment szerinti rétegződése jól ismert mindennek köszönhetően (SACRAMENTO *et al.* 2022), ami egyúttal az evolúciójuk történetét is mutatja, amelyet ma már számos kutatócsoport bizonyított (KIANG 2008).

5.2 A mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérlet eredményeiből levonható következtetések

A modellkísérletből eredményeiből levont megállapításaim az alábbiak:

Az alkalmazott OxiTop készülékkel elvégzett mérés alkalmas a DIC-tartalom meghatározására. Lásd: 4.3.3. fejezet

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 természetközeg 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 (ADAMEC és ONDOK 1992, SHIRAIWA *et al.* 1993, KUO *et al.* 2017, ZERVEAS *et al.* 2021), ami jól megfigyelhető volt a modellkísérletem során is. A legmagasabb végső 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 biomassza növekedéséhez és a pH megemelkedéséhez vezetett. Ihnken és munkatársai (2014) 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 a laborléptékű tenyészetekben a zooplankton-kontroll módszerek alapját képezi (BECKER 1994, PREISIG és ANDERSEN 2005, MONTEMEZZANI *et al.* 2015).

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 (21. 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.

Az algák, mint a globális CO₂ pufferkapacitás alapja

Eredményeim szélesebb környezeti összefüggésben is relevánsak, amennyiben a tengerek és óceánok elsavanyodását nem a vízbe oldódó CO₂ okozza, akkor az algák a biomassa termelésük és az ezzel járó hidroxidion felszabadulás révén nem képesek helyreállítani a víz semleges pH-ját. Mivel az óceánokba kerülő szennyezőanyagok általánosságban hozzájárulnak azok elsavanyodásához (WU és CHEN 2024), így ezzel nemcsak az óceánok CO₂-megkötő képességét csökkenti, hanem az algák aktivitását, regenerációs képességét is korlátozza ezekben az ökoszisztémákban.

5.3 A modellkísérlet eredményeinek összevetése a szakirodalmi adatokkal

A mikroalgák növekedését modellező kísérleti eredmények összehasonlítása az irodalmi adatokkal gyakran kihívást jelent. Az összehasonlítás nehézségei ott kezdődnek, hogy a modellkísérleteket eltérő körülmények között hajtják végre az egyes szerzők. A módszerek egységesítése lehetetlen elvárás lenne, hiszen sok esetben egy-egy ilyen körülmény az a kezelés, ami a kutatás tárgyát képezi. Ilyen esetekben elengedhetetlen, hogy legalább az eredmények szabványosított, egymással összehasonlítható mértékegységekben legyenek megadva. A mikroalga-termesztés szakirodalmát tanulmányozva azonban megállapítható, hogy hiányzik az

egységes megközelítés, így egyes tanulmányok a biomaszra növekedését területegységre vetítve adják meg (HUANG *et al.* 2016, MATOS *et al.* 2018, MELO *et al.* 2018, RAMÍREZ-LÓPEZ *et al.* 2019, VALDOVINOS-GARCÍA *et al.* 2021), míg mások térfogategységre vonatkozó mértékegységeket alkalmaznak (BAMBA *et al.* 2015, AMMAR 2016, CHANG *et al.* 2016, RAZZAK *et al.* 2016, REN *et al.* 2017, ASHOUR *et al.* 2024). A területalapú mértékegységek kevésbé összehasonlíthatók, mivel nem veszik figyelembe az algakultúra mélységét (LIANG *et al.* 2013), így a saját kutatásaim során volumetrikus mértékegységeket alkalmaztam a biomaszra növekedés kifejezésére.

Az objektív összehasonlíthatóságot azonban továbbra is korlátozza a kísérlet időtartama. Bár ez kezelhetőnek tűnhet az időre fajlagosan kifejezett mértékegységek, például mg/L/nap alkalmazásával, azonban ez a megközelítés jelentősen függ a választott időintervallumtól (27. táblázat). A 33. ábrán bemutatott szigmoid növekedési görbék alapján például, ha a 3. nap után a telítődési fázist, vagy az elején lévő lag-fázist nem vesszük figyelembe, a volumetrikus napi produktivitási értékek jelentősen magasabbak lehetnek, amelyek így csak az exponenciális növekedési fázist tükrözik. Összehasonlításképpen a 27. táblázatban bemutatom a különböző megközelítéseket, ahol a különböző mértékegységek alkalmazása megtévesztő lehet.

27. táblázat: A modellkísérlet eredményei alapján meghatározott fajlagos növekedési értékek

Idő (h)	kontroll			0% WBA			10% WBA			25% WBA			50% WBA		
	Konc.	Napi n.	Átl. n.	Konc.	Napi n.	Átl. n.	Konc.	Napi n.	Átl. n.	Konc.	Napi n.	Átl. n.	Konc.	Napi n.	Átl. n.
0	5,6	-	-	5,5	-	-	5,5	-	-	6,5	-	-	7,5	-	-
24	9,8	4,2	4,2	18,4	12,9	12,9	25,4	19,9	19,9	22,8	16,3	16,3	15,2	7,7	7,7
48	13,9	4,1	4,1	46,3	27,9	20,4	99,6	74,3	47,1	85,1	62,2	39,3	36,4	21,2	14,4
72	15,7	1,8	3,4	45,3	-1,0	13,3	135,6	35,9	43,4	168,2	83,1	53,9	92,8	56,4	28,4
96	17,1	1,4	0,8	49,8	4,5	0,9	160,0	24,5	15,1	176,0	7,8	22,7	133,0	40,3	24,2

Megj.: Konc.: az algabiomassza aktuálisan mért koncentrációja (mg/L szárazanyagban kifejezve), a Napi n.: a napi növekedést jelzi (mg/L/nap) az aktuális 24 órás növekedést reprezentálja, míg az Átl. n.: az 1/2/3/4 napos növekedési átlagot fejezi ki

Egyes szerzők az egyes napokra vonatkozó produktivitási értékeket közlik, az átlagértékek feltüntetése nélkül, ami így túlzottan optimista előrejelzésekhez vezethet, ha az algák ipari alkalmazási potenciáljára vonatkozó irodalmi alapú értékelésekben használják fel a méréseikből származó adatokat. Tekintettel arra, hogy a kutatásom fő célja az, hogy elősegítse a mikroalgák általi CO₂ megkötési technológiák elterjedését, kulcsfontosságú, hogy olyan reális értékeket közöljek, amelyek a teljes növekedési ciklus átlagos produktivitását tükrözik. A kísérlet kiértékelése során kiválasztott 10%-os WBA-kezelés produktivitása 43,4 mg/L/nap volt 3 napos

növekedési átlagára kifejezve. A kísérlet során végig ment a 4 napos mérés, de a gyakorlatban 3 nap után le kell állítani az algatermesztést és be kell takarítani a biomasszát, mivel feltételezhetően (a DIC eredmények alapján) a termesztőközegeből a 3. napon elfogyott a felvehető széntartalom. Az általam meghatározott eredmény éves szinten 15,83 kg sz.a. algabiomassza tömeget, amely mintegy 29 kg megkötött CO₂-ot jelenthet köbméterenként az ipari alkalmazás során.

A disszertációmban közölt értékek összhangban vannak több más tanulmány eredményeivel (BAMBA *et al.* 2015, KONG *et al.* 2021), ahol a megfigyelt biomassza termelés 35,83–81,67 mg/L/nap volt. Egy tanulmányban, amelyben a *C. vulgaris* 10%-os CO₂-injektálással ellátott szennyvízben történő termesztése során 381,16–499,52 mg/L növekményt értek el 23 nap alatt, amely napi átlagban 16,5–21,7 mg/L/nap növekedési értéknek feleltethető meg (KONG *et al.* 2021). Egy másik tanulmányban ennél jelentősen magasabb, a saját eredményem 2-6 szorosának megfelelő értékeket mértek a levegőztetett fotobioreaktorban termesztett *Chlorella* sp. esetében, ahol 109–264 mg/L/nap biomasszanövekedést értek el (JAMES *et al.* 1990). A kísérlet során megkötött CO₂ mennyiségének meghatározására több megközelítést is alkalmaztam. A legkézenfekvőbb módszer, ha a mért DIC-koncentrációk különbségéből számoljuk ki a megkötött CO₂ mennyiségét. A 10% WBA-kivonatot tartalmazó kezelés esetében a DIC-tartalom 4 nap alatt lecsökkent ($45,2 \pm 7,96$ mg/L) (10. számú melléklet, M10/3 és M10/4 táblázatok), ami $41,4 \pm 7,3$ mg CO₂/L/nap átlagos megkötési sebességnek felel meg. Másik megközelítésben a CO₂ megkötést az algabiomassza növekedése és annak széntartalma alapján számolhatjuk ki. Mandalam és munkatársai (1998) szerint a *C. vulgaris* biomasszájának széntartalma a száraz tömeg $62 \pm 15\%$ -át teszi ki. E megközelítés alapján a 10%-os WBA-kivonatot tartalmazó kezelés esetében a CO₂ megkötési sebesség 74,7–122,4 mg CO₂/L/nap, azaz 27,3–44,7 kg CO₂/m³/év volt. Más szerzők munkái alapján a maximális szén megkötési kapacitás 4,51–14,26 mg CO₂/L/nap és 56,26–85,72 mg CO₂/L/nap között alakult különböző többlet szénellátottságú körülmények között vizsgálva (KONG *et al.* 2021). 2 és 1 g/L NaHCO₃ alkalmazásával 0,93 és 0,69 g CO₂/L/nap megkötési sebességet értek el 100 mL-es lombikokban (RATOMSKI *et al.* 2021).

Az eredmények alapján látható, hogy ahhoz, hogy ezzel a technológiával karbon semlegesíthessünk akár egy olyan kis gazdaságot, mint Magyarország, ahol a 2022-es kibocsátást 45 millió tonnára becsülték (KSH 2025), óriási területeken kellene fotobioreaktorokat telepíteni. Habár az ilyen rendszerek gazdasági megvalósíthatósága biztosan nem érhető el az algabiomassza lehetőleg magas áron történő értékesítése nélkül, ugyanakkor a szénmegkötés hatékonysága szorosan összefügg az algabiomassza további felhasználásával. Emiatt szükséges integrált, több ipari szektor igényeit egyszerre kielégítő megközelítést alkalmazni a szénmegkötés és -tárolás potenciáljának hatékonysága érdekében.

5.4 A szakirodalomban található alga hozam értékek kritikai áttekintése

Miután az 5.3. fejezetben már felvezettem a szakirodalmi adatok egymással való összevetésének kihívásait, 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 algabiomassza növekedését, így az ipari szektor a gyakorlatban az irodalmi ígéretektől jóval elmaradó eredményeket produkál.

1. érv: A hígítási sorom kiindulási eleme

A biomassza becsléshez felhasznált hígítási sor első eleme egy igen tömény, literenként $1,095 \times 10^{11}$ sejtet tartalmazó szuszpenzió volt. Ahogy az az 16. ábra jobb szélén látható, ez egy igen sötét zöld, már szinte fekete színt mutatott. Ennek biomassza 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 ismert a 2–10 μm -es átmérője (SAFI *et al.* 2014), így meghatározható az algasejt térfogata. Ha ezt felszorozzuk a tömény minta literenkénti sejtszámával, akkor $0,45\text{cm}^3$ és $56,67\text{cm}^3$ 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 sejtmérővel kalkulálva 1920, illetve **16,9 g/L**. Ez alapján kijelenthető, hogy 10 μm -es sejtekkel számolva 17 g/L biomassza 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 (ARAÚJO 2021) 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.

5.5 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 csúcsoakat, 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 szerveszén 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 elnyeletni 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 gázelőtisztítás 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.

6 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 biomassza 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

többször biológiai biomassza 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 kezelése nem gyakoroltak toxikus hatást a *Chlorella vulgaris* mikroalga növekedésére. Ezt a kezelt mintákon mért, a kontroll kezeléshez viszonyított jelentős többször biológiai 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.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A légkör 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 előállítására során. 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 korreláció

pásztázás eredményeként a 440 nm-es hullámhosszt azonosítottam a legmegbízhatóbbnak a *C. vulgaris* biomasszájának UV-VIS spektrofotometriás módszerrel történő meghatározása során. A meghatározott összefüggést, különböző matematikai modellek alkalmazásával tovább pontosítottam, majd meghatároztam az algabiomassza koncentráció (c) és az optikai sűrűség (OD) közötti összefüggést leíró képletet:

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

Az eredmények alapján a két változó között exponenciális kapcsolat áll fenn, amelyet a mikroalgasejtek közötti kitakarási jelenség magyaráz. Az exponenciális modell megbízhatóságát igazolták a további mérések is, amelyek szintén azt bizonyították, hogy a 440 nm-es hullámhossz a legalkalmasabb az algabiomassza gyors és pontos meghatározására.

A kutatás másodlagos célkitűzései közé tartozott a *C. vulgaris* algasejtek fizikai és kémiai jellemzőinek részletes feltárása, továbbá egy gyors, részben automatizált sejtszámlálási módszer kidolgozása is az *ImageJ* szoftver pixel-számláló funkciójának segítségével. A kísérlet eredményeit összefoglalva a *C. vulgaris* algabiomassza UV-VIS spektrofotometriás méréssel történő jellemzéséhez a 440 nm-es hullámhosszt javaslom, amelyet LED vagy lézer fényforrás és fotodióda pár alkalmazásával lehet alkalmazni az különböző ipari felhasználások során. A zavaró hatások csökkentésének érdekében egy második, 750 nm-es referencia hullámhosszt is érdemes lehet bevezetni, amelyet többek között a releváns ISO szabvány és a Felföldy-módszer is alkalmaz.

A második modellkísérlet célja a *C. vulgaris* szénfelvevő képességének vizsgálata volt. Az elválasztott rendszerű mikroalga-alapú CO₂-megkötési eljárást modellezve mosóközegként fabiomassza 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 hamu kivonat 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 célkitűzésének értelmében kidolgoztam egy új módszert az oldott szervetlen széntartalom mérésére az *OxiTop* respirométer alkalmazásával. Bár az eljárás validálása további párhuzamos méréseket igényel, az eredmények igen ígéretesnek mutatkoztak a módszer alkalmazhatóságát illetően. Az elvégzett mérések alapján sikeresen vizsgáltam a hamu kivonat CO₂ elnyelését és az algák CO₂ felvételét is az oldatból az *OxiTop* készülék alkalmazásával. A következő lépésben öt különböző kezelés (eltérő mennyiségű hamu kivonatot tartalmazó kezelések) hatásait vizsgáltam annak érdekében, hogy meghatározzam a hamu kivonat azon optimális koncentrációját, amely mellett az algasejtek növekedése a legjelentősebbnek bizonyul, a potenciális toxikus hatások elkerülése mellett. Az eredményeim

alapján a 10%-os hamu kivonat-kezelés és a CO₂-diffúzió együttes alkalmazása bizonyult a leghatékonyabbnak, mivel ez a kombináció jelentős biomasszanövekedést eredményezett anélkül, hogy növekedést gátló hatásokat tapasztaltam volna. Az algabiomassza, a pH, valamint az oldott szerves szénttartalom meghatározásának mérési eredményei megerősítették, hogy a *C. vulgaris* képes regenerálni a lúgos CO₂-elnyelő közegként szolgáló hamu kivonatot.

A további kutatások keretein belül érdemes lenne vizsgálni az algasejtek beltartalmi értékeinek változását is a különböző kezelések hatására, amely során feltárhatók az előállított biomassza lehetséges ipari felhasználási területei. A fabiomassza hamu kivonatot célszerű lenne különböző évszakokban vett mintákon is elemezni, hogy a szezonális okozta minőségbeli eltérések hatásait felmérjük. Célszerű lenne a kezelés után visszamaradó hamu kivonat összetételének vizsgálatát is elvégezni, hogy meghatározhassuk a további felhasználási és regenerációs lehetőségeket is. Emellett az alga-növekedésére gyakorolt hatásokat valós ipari füst- és biogázok alkalmazásával is meg kell vizsgálni, hogy azonosíthassuk azokat a komponenseket, amelyek az algasejtek növekedését támogatják vagy gátolják. Az elvégzett kutatói munka ugyanakkor rávilágított arra is, hogy a szakirodalomban elérhető egyes becslések eredményeihez képest jelentősen alacsonyabb biomassza-termelési potenciál érhető el valós körülmények között, így a mikroalga-alapú CO₂-megkötési technikák ipari alkalmazása további vizsgálatokat és optimalizálást igényel, különös tekintettel a gazdasági szempontokra, valamint az üzemi léptékű rendszerek kialakításának feltételeire.

8 SUMMARY

The atmospheric CO₂ concentration has increased from a level of 280 ppm in the 1700s to 427 ppm today, leading to severe consequences such as sea-level rise, increasingly frequent and extreme weather events, and the adverse impacts of global climate change. Among the European Union's climate neutrality goals are increasing the use of renewable energy sources and developing innovative technologies, such as various CO₂ capture and utilization solutions. Microalgae-based CO₂ capture could be a promising solution for reducing emissions. Due to their rapid growth rates and high photosynthetic efficiency, algae can absorb significantly more CO₂ per unit of time and area than terrestrial plants. The application of algae-based methods is not only environmentally friendly but also economically advantageous, as it can generate valuable by-products. Thus, the use of microalgae offers not only a solution to the CO₂ capture problem but also new opportunities for the sustainable production of biofuels, fertilizers, and other industrial products. Despite the many advantages of microalgae-based CO₂ capture systems, their implementation faces considerable technological and economic challenges.

In my dissertation, I present the results of two model experiments, both aimed at promoting the application of microalgae in various environmental technologies, with a particular focus on CO₂ reduction techniques. The primary objective of the first study was to develop a simple, fast, and low-resource biomass estimation method for algae. In the investigations, I examined and compared the applicability of widely studied methods and parameters (e.g., magnesium content, chlorophyll-a content, and algal cell count) for the quantitative determination of the biomass of the commonly researched algal species *Chlorella vulgaris*. In the first model experiment, I investigated the correlation among six different laboratory methods based on UV-VIS spectrophotometry, using the results of parallel measurements performed on members of a dilution series prepared from a concentrated *C. vulgaris* stock solution. The goal of the experiment was to determine the optimal wavelength at which the optical density shows the strongest correlation with other parameters characteristic of algal biomass. Since the wavelengths recommended in the literature for measuring chlorophyll pigment spectra cover a wide range, I employed a correlation scanning technique to identify the precise wavelength. This technique involved correlating the optical density data measured at individual wavelengths with various laboratory parameters (e.g., cell count, dry matter content, chlorophyll-a concentration) determined on different members of the dilution series using linear regression. As a result of the correlation scanning, I identified the 440 nm wavelength as the most reliable for determining the biomass of *C. vulgaris* by the UV-VIS spectrophotometric method. The established correlation was further refined using various

mathematical models, and I derived a formula describing the relationship between dra algal biomass concentration (c) and optical density (OD):

$$C_{\text{algal biomass}} (\text{mg/L d.m.}) = \ln (1 - OD_{440 \text{ nm}} / 3,29) / (-0,0022)$$

The results indicate that an exponential relationship exists between the two variables, which can be explained by the shading effect among microalgal cells. The reliability of the exponential model was confirmed by further measurements, which also proved that the 440 nm wavelength is the most suitable for the rapid and accurate determination of algal biomass.

A secondary objective of the research was to examine in detail the physical and chemical characteristics of *C. vulgaris* algal cells, as well as to develop a rapid, partially automated cell counting method using the pixel counting function of the ImageJ software. Summarizing the experimental results, I recommend the 440 nm wavelength for characterizing *C. vulgaris* biomass via UV-VIS spectrophotometric measurement. This wavelength can be implemented using a LED or laser light source paired with a photodiode for various industrial applications. To reduce interference effects, it might also be advisable to introduce a second, 750 nm reference wavelength, as applied in the relevant ISO standard and the Felföldy method.

The objective of the second model experiment was to investigate the CO₂ uptake capacity of *C. vulgaris*. Modeling a separated system microalgae-based CO₂ capture process, I used a water extract of ash derived from the combustion of wood biomass as a washing medium. The chosen raw material is globally widespread and sustainable, so its use could contribute to achieving the fundamental goals of a circular economy. In the first step, I examined the flue gas cleaning capacity of the ash extract by applying model flue gas. CO₂ was introduced from a gas cylinder into the ash water extract through a diffuser in the form of fine bubbles, while I monitored the changes in pH. As part of a secondary objective of the experiment, I developed a new method for measuring the dissolved inorganic carbon content using the OxiTop respirometer. Although the validation of the procedure requires further parallel measurements, the results appeared very promising regarding the applicability of the method. Based on the measurements performed, I successfully examined the CO₂ absorption of the ash extract and the CO₂ uptake by the algae from the solution using the OxiTop device. In the next step, I investigated the effects of five different treatments (with varying amounts of ash extract) to determine the optimal concentration of the ash extract at which algal cell growth is most significant while avoiding potential toxic effects. According to my results, the combined application of a 10% ash extract treatment and CO₂ diffusion proved to be the most effective, as this combination resulted in significant biomass growth without any observed growth-inhibiting effects. The measurement results for algal biomass, pH, and dissolved inorganic carbon

content confirmed that *C. vulgaris* is capable of regenerating the ash extract, which serves as an alkaline CO₂-capturing medium.

Within the framework of further research, it would be worthwhile to examine the changes in the intracellular content of the algal cells in response to the different treatments, which could reveal potential industrial applications for the produced biomass. It would also be advisable to analyze samples of wood biomass ash extract collected in different seasons to assess the impact of seasonal variations on quality. Additionally, it would be beneficial to examine the composition of the residual ash extract after treatment to determine further utilization and regeneration possibilities. Moreover, the effects on algal growth should be investigated using actual industrial flue gases and biogases to identify those components that promote or inhibit the growth of algal cells. The research also highlighted that the biomass production potential achievable under real conditions is significantly lower than some estimates available in the literature, indicating that the industrial application of microalgae-based CO₂ capture techniques requires further investigation and optimization, particularly with regard to economic considerations and the conditions for the establishment of industrial-scale systems.

M1: IRODALOMJEGYZÉK

- AARON, D., TSOURIS, C. (2005) Separation of CO₂ from flue gas: a review. *Separation Science and Technology*, **40**, 321-348.
- ABD, A.A., NAJI, S.Z., HASHIM, A.S., OTHMAN, M.R. (2020) Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 104142.
- ABDULQADER, G., BARSANTI, L., TREDICI, M. (2000) Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu. *Journal of Applied Phycology*, **12**, 493-498.
- ABOU-SHANAB, R. (2015) Green renewable Energy for Sustainable socio-economic development. *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, (pp. 3-5).
- ADAMCZYK, J., SMOŁKA-DANIEŁOWSKA, D., KRZĄTAŁA, A., KRZYKAWSKI, T. (2024) Chemical and mineral composition of bottom ash from agri-food biomass produced under low combustion conditions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **21**, 4025-4036.
- ADAMEC, L., ONDOK, J.P. (1992) Water alkalization due to photosynthesis of aquatic plants: The dependence on total alkalinity. *Aquatic Botany*, **43**, 93-98.
- AFZAL, M., OBUEKWE, C., SHUAIB, N., BARAKAT, H. (2004). Photosynthetic pigment profile of *Cordia myxa* L. and its potential in folklore medicinal application. *Journal of Food Agriculture and Environment*, **2**, 114-120.
- AHMAD, A., HASSAN, S.W., BANAT, F. (2022) An overview of microalgae biomass as a sustainable aquaculture feed ingredient: Food security and circular economy. *Bioengineered*, **13**, 9521-9547.
- ALBANESE, L., CIRIMINNA, R., MENEGUZZO, F., PAGLIARO, M. (2015) Energy efficient inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* via controlled hydrodynamic cavitation. *Energy Science & Engineering*, **3**, 221-238.
- ALGAE RESEARCH AND SUPPLY (2024) Measuring Growth.
<https://algaeresearchsupply.com/pages/measuring-growth>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- ALGOMED (2024) Die *Chlorella*-Farm von Algomed im Herzen der Altmark.
<https://www.algomed.de/algenfarm/anbau/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- AL HATTAB, M., GHALY, A., HAMMOUDA, A. (2015) Microalgae harvesting methods for industrial production of biodiesel: critical review and comparative analysis. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, **5**, 2.
- ALI, S., AKTER, S., YMERI, P., FOGARASSY, C. (2022) How the use of biomass for green energy and waste incineration practice will affect GDP growth in the less developed countries of the EU (A case study with Visegrad and Balkan countries). *Energies*, **15**, 2308.
- ALIGA (2024) ALIGA Microalgae. <https://www.aliga.dk/products>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- ALMOMANI, F.A., ÖRMECI, B. (2018) Monitoring and measurement of microalgae using the first derivative of absorbance and comparison with chlorophyll extraction method. *Environmental Monitoring and Assessment*, **190**, 90.
- ALVAREZ, A.L., WEYERS, S.L., GOEMANN, H.M., PEYTON, B.M., GARDNER, R.D. (2021) Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, **54**, 102200.
- AMIN, M., TAHIR, F., ASHFAQ, H., AKBAR, I., RAZZAQUE, N., HAIDER, M.N., XU, J., ZHU, H., WANG, N., SHAHID, A. (2022) Decontamination of industrial wastewater using microalgae integrated with biotransformation of the biomass to green products. *Energy Nexus*, **6**, 100089.
- AMMAR, S.H. (2016) Cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris* in airlift photobioreactor for biomass production using commercial NPK nutrients. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, **12**, 90-99.
- ANDRADE, L.M., ANDRADE, C.J., DIAS, M., NASCIMENTO, C., MENDES, M.A. (2018) *Chlorella* and *Spirulina* microalgae as sources of functional foods, nutraceuticals, and food supplements; an overview. *MOJ Food Processing & Technology*, **6**, 45-58.
- ARAÚJO, R., VÁZQUEZ CALDERÓN, F., SÁNCHEZ LÓPEZ, J., AZEVEDO, I. C., BRUHN, A., FLUCH, S., GARCIA TASENDE, M., GHADERIARDAKANI, F., ILMJÄRV, T., LAURANS, M., MAC MONAGAIL, M., MANGINI, S., PETEIRO, C., REBOURS, C., STEFANSSON, T., ULLMANN, J. (2021) Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the blue bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, **7**, 626389.
- ARSLAN, Z., TYSON, J.F. (1999) Determination of calcium, magnesium and strontium in soils by flow injection flame atomic absorption spectrometry. *Talanta*, **50**, 929-3937.

- ASHOUR, M., MANSOUR, A.T., ALKHAMIS, Y.A., ELSHOBARY, M. (2024) Usage of *Chlorella* and diverse microalgae for CO₂ capture-towards a bioenergy revolution. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **12**, 1387519.
- AZOV, Y. (1982) Effect of pH on inorganic carbon uptake in algal cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, **43**, 1300-1306.
- BABICH, I.V., VAN DER HULST, M., LEFFERTS, L., MOULIJN, J. A., O'CONNOR, P., SESHAN, K. (2011) Catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality liquid bio-fuels. *Biomass and Bioenergy*, **35**, 3199-3207.
- BAI, A., JOBBÁGY, P., DURKÓ, E. (2011) Algae production for energy and foddering. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **1**, 163-171.
- BAI, A., STÜNDL, L., BÁRSONY, P., FEHÉR, M., JOBBÁGY, P., HERPERGEL, Z., VASZKÓ, G. (2012) Algae production on pig sludge. *Agronomy for Sustainable Development*, **32**, 611-618.
- BALCH, W.E., MAGRUM, L.J., FOX, G.E., WOLFE, R.S., WOESE, C.R. (1977) An ancient divergence among the bacteria. *Journal of Molecular Evolution*, **9**, 305-311.
- BALLAH, M., VISHWAKALYAN, B., NEETOO, H. (2019) Assessment of the physico-chemical quality and extent of algal proliferation in water from an impounding reservoir prone to eutrophication. *Journal of Ecology and Environment*, **43**, 5.
- BAMBA, B.S.B., LOZANO, P., ADJÉ, F., OUATTARA, A., VIAN, M.A., TRANCHANT, C., LOZANO, Y. (2015) Effects of temperature and other operational parameters on *Chlorella vulgaris* mass cultivation in a simple and low-cost column photobioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **177**, 389-406.
- BARGU, S., SILVER, M.W., OHMAN, M.D., BENITEZ-NELSON, C.R., GARRISON, D.L. (2012) Mystery behind Hitchcock's birds. *Nature Geoscience*, **5**, 2-3.
- BARKER, H.A. (1935) Photosynthesis in diatoms. *Archives of Microbiology*, **6**, 141-156.
- B-BÉRES, V., STENGER-KOVÁCS, C., BUCZKÓ, K., PADISÁK, J., SELMECZY, G.B., LENGYEL, E., TAPOLCZAI, K. (2023) Ecosystem services provided by freshwater and marine diatoms. *Hydrobiologia*, **850**, 2707-2733.
- BECKER, E.W. (1986) Nutritional properties of microalgae: potentials and constraints. In: RICHMOND, A. (Szerk.): *Handbook of microalgal mass culture*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc, pp. 339-420.
- BECKER, E.W. (1994) *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 293 pp.

- BECKER, W.E., VENKATARAMAN, L.V., KHANUM, P.M. (1976) Digestibility coefficient and biological value of the proteins of the alga *Scenedesmus acutus* processed by different methods. *Nutrition Reports International*, **14**, 457-466.
- BELAY, A., OTA, Y., MIYAKAWA, K., SHIMAMATSU, H. (1993) Current knowledge on potential health benefits of *Spirulina*. *Journal of Applied Phycology*, **5**, 235-241.
- BENEMANN, J.R., WEISSMAN, J.C., GOEBEL, R.P., AUGENSTEIN, D.C. (1986) Microalgae fuel economics. In: BARCLAY, W.R., MCINTOSH, R.P. (Szerk.): *Algal biomass technologies*. New York: Lubrecht & Cramer, pp. 176-191.
- BENSON, S.M., COLE, D.R. (2008) CO₂ sequestration in deep sedimentary formations. *Elements*, **4**, 325-331.
- BERNARD, O. (2011) Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production. *Journal of Process Control*, **21**, 1378-1389.
- BERNARD, O., GOUZÉ, J.-L. (1999) Non-linear qualitative signal processing for biological systems: Application to the algal growth in bioreactors. *Mathematical Biosciences*, **157**, 357-372.
- BIALON, J., RATH, T. (2018) Growth rates and photon efficiency of *Chlorella vulgaris* in relation to photon absorption rates under different LED-types. *Algal Research*, **31**, 204-215.
- BIDIGARE, R.R., ONDRUSEK, M.E., MORROW, J.H., KIEFER, D.A. (1990) *In-vivo* absorption properties of algal pigments. *Ocean Optics X*, **1302**, 290-302.
- BÍRÓ (2017) Az alga és bioplazma termékek mezőgazdasági használatának lehetőségei. <https://attendsa.hu/wp-content/uploads/2019/02/Az-alga-e%CC%81s-bioplazma-terme%CC%81kek-mezo%CC%8Bgazdasa%CC%81gi-haszna%CC%81lata%CC%81nak-leheto%CC%8Bse%CC%81gei.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- BITO, T., OKUMURA, E., FUJISHIMA, M., WATANABE, F. (2020) Potential of *Chlorella* as a dietary supplement to promote human health. *Nutrients*, **12**, 2524.
- BLAIR, M.F., KOKABIAN, B. GUDE, V.G. (2014) Light and growth medium effect on *Chlorella vulgaris* biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2**, 665-674.
- BLANCO-VIEITES, M., SUÁREZ-MONTES, D., DELGADO, F., ÁLVAREZ-GIL, M., HERNÁNDEZ BATTEZ, A., RODRÍGUEZ, E. (2022) Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research*, **64**, 102700.
- BLANKEN, W.M., POSTMA, P.R., DE WINTER, L., WIJFFELS, R.H., JANSSEN, M.G.J. (2016) Predicting microalgae growth. *Algal Research*, **14**, 28-38.
- BLOOM, D.E. (2011) 7 billion and counting. *Science*, **29**, 562-569.

- BME (2025) Dr. Németh Áron. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
<https://www.ch.bme.hu/magunkrol/munkatarsak/16481-nemeth-aron>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- BOCSI, R. (2016) Mikroalgák termesztése laboratóriumi és szabadtéri flat panel foto-bioreaktorokban. Doktori értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém, 149 pp.
- BONENFANT, D., MIMEAULT, M., HAUSLER, R. (2003) Determination of the structural features of distinct amines important for the absorption of CO₂ and regeneration in aqueous solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **42**, 3179-3184.
- BORICS, G. (2016) Felszíni vizek fitoplankton alapú ökológiai állapotértékelése. Akadémiai nagydoktori mű, Magyar Tudományos Akadémia, Ökológiai Kutatóközpont, Duna-kutató Intézet, Debrecen, 145 pp.
- BOROWITZKA, M. A. (1999) Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, **70**, 313-321.
- BOŠNJKOVIĆ, M. (2013) Biodiesel from algae. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, **3**, 179-188.
- BOŠNJKOVIĆ, M.; SINAGA, N. The perspective of large-scale production of algae biodiesel. *Applied Sciences*, **10**, 8181.
- BOURGES, H. (1986) Spirulina: a Food Product? *International Symposium Food & Biotechnology*, Quebec, Canada.
- BOURGOUGNON, N., BURLOT, A.-S., JACQUIN, A.G. (2021) Algae for global sustainability? In: JACQUOT, J.-P. (Szerk.): *Advances in Botanical Research*. Cambridge, MA, USA: Academic Press, pp. 145-212.
- BP (2022) bp Statistical Review of World Energy. London: Whitehouse Associates, 58 pp.
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- BRAHMANDAM, S. (2024) Mathematical modeling of the optimal light wavelength for increasing biomass and cell size of *Chlorella vulgaris* as a basis for enhancing biofuel production. <https://imsa.edu/mathematical-modeling-of-the-optimal-light-wavelength-for-increasing-biomass-and-cell-size-of-chlorella-vulgaris-as-a-basis-for-enhancing-biofuel-production/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- BRITANNICA (2025) Stromatolite. <https://www.britannica.com/science/stromatolite>.
 Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- BROWN, L.M., ZEILER, K.G. (1993) Aquatic biomass and carbon dioxide trapping. *Energy Conversion and Management*, **34**, 1005-1013.
- BURLEW, J.S. (1953) Algal culture. From Laboratory to Pilot Plant. Washington DC, USA: Carnegie Institution of Washington Publication, 369 pp.
- BWATANGLANG, I.B., FARUQ, M., GUPTA, A.K., YUSOF, N.A. (2015) Algae-derived biomass for sustainable and renewable biofuel production. In: Hakeem, K.R., Jawaid, M., Alothman, O.Y. (Szerk.): *Agricultural Biomass Based Potential Materials*. Cham, Switzerland: Springer, pp. 341-373.
- CAI, J., LOVATELLI, A., AGUILAR-MANJARREZ, J., CORNISH, L., DABBADIE, L., DESROCHERS, A., DIFFEY, S., GARRIDO GAMARRO, E., GEEHAN, J., HURTADO, A., LUCENTE, D., MAIR, G., MIAO, W., POTIN, P., PRZYBYLA, C., REANTASO, M., ROUBACH, R., TAUATI, M., YUAN, X. (2021) Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1229. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cb5670en>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- CADONDON, J.G., ONG, P.M.B., VALLAR, E.A., SHIINA, T., GALVEZ, M.C.D. (2022) Chlorophyll-a pigment measurement of *Spirulina* in algal growth monitoring using portable pulsed LED fluorescence lidar system. *Sensors*, **22**, 2940.
- CALVIN, M. (1956) The photosynthetic carbon cycle. *Journal of the Chemical Society*, 1895-1915.
- CALVIN, M., BASSHAM, J.A., BENSON, A.A. (1950) Chemical transformations of carbon in photosynthesis. *Federation Proceedings*, **9**, 524-534.
- CARDOZO, K.H.M., GUARATINI, T., BARROS, M.P., FALCÃO, V.R., TONON, A.P., LOPES, N.P., CAMPOS, S., TORRES, M.A. SOUZA, A.O., COLEPICOLO, P., PINTO, E. (2007) Metabolites from algae with economical impact. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, **146**, 60-78.
- CAROPPO, C., PAGLIARA, P. (2022) Microalgae: a promising future. *Microorganisms*, **10**, 1488.
- CARVALHO, A.P., SILVA, S., BAPTISTA, J.M., MALCATA, F. (2011) Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **89**, 1275-1288.
- CHAFFER, L. (2018) People and economic activity-exam preparation activity. *Geography Bulletin*, **1**, 45-54.

- CHANG, H.X., HUANG, Y., FU, Q., LIAO, Q., ZHU, X. (2016) Kinetic characteristics and modeling of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and CO₂ biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon. *Bioresource Technology*, **206**, 231-238.
- CHAPMAN, R.L. (2013) Algae: the world's most important "plants" - an introduction. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **18**, 5-12.
- CHATTON, E. (1938) Titres et travaux scientifiques (1906-1937). Sette, Sottano, Italy.
- CHI, Z., O'FALLON, J.V., CHEN, S. (2011) Bicarbonate produced from carbon capture for algae culture. *Trends in Biotechnology*, **29**, 537-541.
- CHISTI, Y. (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25**, 294-306.
- CHISTI, Y. (2020) Microalgae biotechnology: A brief introduction. In: JACOB-LOPES, E., MANZONI MARONEZE, M., QUEIROZ, M.I., QUEIROZ ZEPKA, L. (Szerk.): *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. Cambridge, MA, USA: Academic Press, pp. 3-23.
- CHIU, S., KAO, C., TSAI, M., ONG, S., CHEN, C., LIN, C. (2009) Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technology*, **100**, 833-838.
- CHORUS, I., BARTRAM, J. (1999) Toxic cyanobacteria in water - A guide to their public health consequences, monitoring and management. UK, Suffolk: St Edmundsbury Press, Bury St Edmunds, 399 pp.
- CHUNG, S.H., CERUSSI, A.E., MERRITT, S.I., RUTH, J., TROMBERG, B.J. (2010) Non-invasive tissue temperature measurements based on quantitative diffuse optical spectroscopy (DOS) of water. *Physics in Medicine & Biology*, **55**, 3753.
- CHUNZHUK, E.A., GRIGORENKO, A.V., KISELEVA, S.V., CHERNOVA, N.I., RYNDIN, K.G., KUMAR, V., VLASKIN, M.S. (2023) The influence of elevated CO₂ concentrations on the growth of various microalgae strains. *Plants*, **12**, 2470.
- CIFERRI, O. (1983) Spirulina, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*, **47**, 551.
- CLEMENTSON, L.A., WOJTASIEWICZ, B. (2019) Dataset on the *in vivo* absorption characteristics and pigment composition of various phytoplankton species. *Data in Brief*, **25**, 104020.
- COCKELL, C.S. (1998) Biological effects of high ultraviolet radiation on early Earth - a theoretical evaluation. *Journal of Theoretical Biology*, **193**, 717-729.
- COHEN, Z. (1986) Products from microalgae. In: RICHMOND, A. (Szerk.): *Handbook of microalgal mass culture*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc, pp. 421-454.

- COPELAND, H.F. (1956) The classification of lower organisms. Palo Alto, USA: Pacific Books, 302 pp.
- CORONADO-REYES, J.A., GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J.C. (2023) Vitamins from microalgae. In: JACOB-LOPES, E., QUEIROZ, M.I., MANZONI MARONEZE, M., QUEIROZ ZEPKA, L. (Szerk.): *Handbook of Food and Feed from Microalgae*. Cambridge, USA: Academic Press, pp. 111-115.
- CRIPPA, M., GUIZZARDI, D., MUNTEAN, M., SCHAAF, E., DENTENER, F., VAN AARDENNE, J.A., JANSSENS-MAENHOUT, G. (2018) Gridded emissions of air pollutants for the period 1970–2012 within EDGAR v4. 3.2. *Earth System Science Data*, **10**, 1987-2013.
- CRITCHLEY, T., OHNO, M. (1998) Seaweed resources of the world. Yokosuka, Japan: Japan International Cooperation Agency, 104 pp.
- CURTIN, M.E. (1985) Chemicals from the sea. *Nature Biotechnology*, **3**, 34-37.
- DAVIS, K. (2004) Photosynthesis got a really early start. NewScientist, UK.
<https://www.newscientist.com/article/mg18424671-600-photosynthesis-got-a-really-early-start/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- DEBRECENI EGYETEM (2021) Dr. Bácsi István, egyetemi adjunktus (DE).
<https://unideb.hu/dr-bacsi-istvan-egyetemi-adjunktus-de>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- DEMIRBAS, A. (2004) Current technologies for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. *Energy Sources*, **26**, 715-730.
- DEPAOLO, D.J., COLE, D.R. (2013) Geochemistry of geologic carbon sequestration: an overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **77**, 1-14.
- DEEPA, P., SOWNDHARARAJAN, K., KIM, S. (2023) A review of the harvesting techniques of microalgae. *Water*, **15**, 3074.
- DE LA NOUE, J., DE PAUW, N. (1988) The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. *Biotechnology advances*, **6**, 725-770.
- DE MENDONCA, H.V., ASSEMAN, P., ABREU, M., COUTO, E., MACIEL, A.M., DUARTE, R.L., REIS, A. (2021) Microalgae in a global world: New solutions for old problems? *Renewable Energy*, **165**, 842-862.
- DE MORAIS, M.G., COSTA, J.A.V. (2007) Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. *Biotechnology Letters*, **29**, 1349-1352.

- DE MORAIS, E.G., SAMPAIO, I.C.F., GONZALEZ-FLO, E., FERRER, I., UGGETTI, E., GARCÍA, J. (2023) Microalgae harvesting for wastewater treatment and resources recovery: a review. *New biotechnology*, **78**, 84-94.
- DE PAUW, N., MORALES, J., PERSOONE, G. (1984) Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints. *Hydrobiologia*, **116**, 121-134.
- DRAGONE, G., FERNANDES, B.D., VICENTE, A.A., TEIXEIRA, J.A. (2010) Third generation biofuels from microalgae. In: MÉNDEZ-VILAS, A. (Szerk.): *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology*. Badajoz, Spain: Formatex Research Center, pp. 1355-1366.
- DUFFY, K.A., SCHWALM, C.R., ARCUS, V.L., KOCH, G.W., LIANG, L.L., SCHIPPER, L.A. (2021) How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? *Science Advances*, **7**, 3.
- DUTCHER, B., FAN, M., RUSSELL, A.G. (2015). Amine-based CO₂ capture technology development from the beginning of 2013 - a review. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 2137-2148.
- ECKART, P. (2013) Spaceflight life support and biospherics. Dordrecht, Netherlands: Springer Dordrecht, 444 pp.
- EGBO, M.K., OKOANI, A.O., OKOH, I.E. (2018) Photobioreactors for microalgae cultivation – an overview. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **9**, 65-74.
- ELISABETH, B., RAYEN, F., BEHNAM, T. (2021) Microalgae culture quality indicators: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, **41**, 457-473.
- ELLIOTT, J.A. (2010). The seasonal sensitivity of cyanobacteria and other phytoplankton to changes in flushing rate and water temperature. *Global Change Biology*, **16**, 864-876.
- ESQUENAZI, E., JONES, A.C., BYRUM, T., DORRESTEIN, P.C., GERWICK, W.H. (2011) Temporal dynamics of natural product biosynthesis in marine cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 5226-5231.
- EUROPEAN COMMISSION (2019) Brief on algae biomass production. Joint Research Centre, European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/402819>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL (2021) Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’). *Official Journal of the European Union*, **L243**, 1-17.

- FAGORITE, V.I., ONYEKURU, S.O., OPARA, A.I., OGUZIE, E.E. (2023) The major techniques, advantages, and pitfalls of various methods used in geological carbon sequestration. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **20**, 4585-4614.
- FALKOWSKI, P.G., BARBER, R.T., SMETACEK, V. (1998) Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, **281**, 200-206.
- FAN, L., ZHANG, Y., CHENG, L., ZHANG, L., TANG, D., CHEN, H. (2007) Optimization of carbon dioxide fixation by *Chlorella vulgaris* cultivated in a membrane-photobioreactor. *Chemical Engineering & Technology*, **30**, 1094-1099.
- FAN, L.H., ZHANG, Y.T., ZHANG, L., CHEN, H.L. (2008) Evaluation of a membrane-sparged helical tubular photobioreactor for carbon dioxide biofixation by *Chlorella vulgaris*. *Journal of Membrane Science*, **325**, 336-345.
- FAO (1973) Energy and protein requirement. Report of a Joint FAO/WHO *Ad Hoc* Expert Committee. [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41042/WHO TRS 522 eng.pdf](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41042/WHO_TRS_522_eng.pdf). Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- FAO (2009) *Laminaria japonica* (Areschoug, 1851) [*Laminariaceae*]. https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/aquaculture/I1129m/file/en/en_japanesekelp.htm. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- FAO (2020) The state of world fisheries and aquaculture 2020. Rome: FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/170b89c1-7946-4f4d-914a-fc56e54769de/content>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- FAO (2021) The state of the World's forests 2021. Rome: FAO, 166 pp.
- FAO (2022) Fishery and Aquaculture. Rome: FAO. <https://www.fao.org/fishery/en/topic/16073/en>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- FARRAR, W.V. (1966) Tecuitlatl; a glimpse of Aztec food technology. *Nature*, **211**, 341-342.
- FARRELLY, D.J., EVERARD, C.D., FAGAN, C.C., MCDONNELL, K.P. (2013) Carbon sequestration and the role of biological carbon mitigation: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **21**, 712-727.
- FEKETE, GY. (2014) Impact of biogas injection on growth of algal biomass. Master's thesis, Cranfield University, Cranfield, UK.
- FEKETE, GY. (2016) Mikroalga tenyésztési módszerek. *Biohulladék*, **10**, 35-40.
- FEKETE, GY. (2017) Industrial use of microalgal biomass. *Biohulladék*, **11**, 13-19.
- FEKETE, GY., SEBŐK, A., KLÁTYIK, SZ., VARGA, ZS.I., GRÓSZ, J., CZINKOTA, I., SZÉKÁCS, A., ALEKSZA, L. (2024a) Comparative analysis of laboratory-based and

- spectroscopic methods used to estimate the algal density of *Chlorella vulgaris*. *Microorganisms*, **12**, 1050.
- FEKETE, GY., KLÁTYIK, SZ., SEBŐK, A., DÁLNOKI, A. B., TAKÁCS, A., GULYÁS, M., CZINKOTA, I., SZÉKÁCS, A., ALEKSZA, L. (2024b). Optimization of a *Chlorella vulgaris*-based carbon sequestration technique using an alkaline medium of wood biomass ash extract. *WATER*, **16**, 3696.
- FELFÖLDY, L. (1964) Kétköbméteres algatermesztő berendezés Tihanyban. *A Magyar Tudományos Akadémia Tihanyi Biológiai Kutatóintézetének évkönyve*, **31**, 185-222.
- FELFÖLDY, L. (1974) A biológiai vízminősítés. - In: Felföldy, L. (szerk.) *Vízügyi Hidrobiológia 3. VIZDOK*, Budapest. pp. 242.
- FELFÖLDY, L. (1987) Biological water qualification. Budapest: Water Management Institute. 190 pp.
- FERNÁNDEZ, F. A., SEVILLA, J. F., GRIMA, E. M. (2013) Photobioreactors for the production of microalgae. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **12**, 131-151.
- FERNÁNDEZ-LINARES, L.C., BARAJAS, C.G., PÁRAMO, E.D., CORONA, J.A.B. (2017) Assessment of *Chlorella vulgaris* and indigenous microalgae biomass with treated wastewater as growth culture medium. *Bioresource Technology*, **244**, 400-406.
- FERRANDO, N.S., BENÍTEZ, H.H., GABELLONE, N.A., CLAPS, M.C., ALTAMIRANO, P.R. (2015) A quick and effective estimation of algal density by turbidimetry developed with *Chlorella vulgaris* cultures. *Limnetica*, **34**, 397-406.
- FILEP, T., RÉKÁSI, M. (2011) Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary. *Geoderma*, **162**, 312-318.
- FILONCHYK, M., PETERSON, M.P., ZHANG, L., HURYNOVICH, V., HE, Y. (2024) Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, **935**, 173359.
- FLORES, G., RODRIGUEZ-MATA, A.E., AMABILIS-SOSA, L.E., GONZALEZ-HUITRON, V.A., HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, O., LOPÉZ-PERÉZ, P.A. (2020) A turbidity sensor development based on NL-PI observers: Experimental application to the control of a Sinaloa's River *Spirulina maxima* cultivation. *Open Chemistry*, **18**, 1349-1361.
- FODORPATAKI, L. (2021) Algák biotechnológiai és ökotoxikológiai alkalmazásai. Egyetemi jegyzet, Kolozsvár, Románia: Babeş-Bolyai Tudományegyetem, 106 pp.

- FODORPATAKI, L., SZIGYÁRTÓ, L. (2006) 100 éve született Péterfi István, a kolozsvári egyetem növényélettan tanára és az algakutatás jeles szakembere. *Acta scientiarum Transylvanica - Múzeumi Füzetek*, **14**, 15-25.
- FRESHWATER AQUACULTURE (2025) If algae produce oxygen in a pond, how can having too much algae cause an oxygen depletion? <https://freshwater-aquaculture.extension.org/if-algae-produce-oxygen-in-a-pond-how-can-having-too-much-algae-cause-an-oxygen-depletion/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- GALCSIK, K. (2019) Mikroalga elválasztási és víztelenítési módszerek összehasonlítása. Szakdolgozat, Szent István Egyetem, Gödöllő.
- GARCÍA-LÓPEZ, D.A., OLGUÍN, E.J. (2020) Potential strategies and opportunities for the development of *Arthrospira maxima* (*Spirulina*) processes: a review. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, **11**, 1-14.
- GARRIDO-CARDENAS, J.A., MANZANO-AGUGLIARO, F., ACIEN-FERNANDEZ, F.G., MOLINA-GRIMA, E. (2018) Microalgae research worldwide. *Algal research*, **35**, 50-60.
- GLOBAL CCS INSTITUTE (2021) Global status of CCS 2021. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- GLIBERT, P. M., SEITZINGER, S., HEIL, C. A., BURKHOLDER, J. M., PARROW, M. W., CODISPOTI, L. A., & KELLY, V. (2005) Eutrophication. *Oceanography*, **18**, 198.
- GOLDMAN, J.C., PORCELLA, D.B., JOE MIDDLEBROOKS, E., TOERIEN, D.F. (1972) The effect of carbon on algal growth -its relationship to eutrophication. *Water Research*, **6**, 637-679.
- GOLDMAN, J.C., AZOV, Y., RILEY, C.B., DENNETT, M.R. (1982) The effect of pH in intensive microalgal cultures. I. Biomass regulation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **57**, 1-13.
- GOLI, A., SHAMIRI, A., TALAIEKHOZANI, A., ESHTIAGHI, N., AGHAMOHAMMADI, N., AROUA, M.K. (2016) An overview of biological processes and their potential for CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, **183**, 41-58.
- GÖRS, M., SCHUMANN, R., HEPERLE, D., KARSTEN, U. (2009) Quality analysis of commercial *Chlorella* products used as dietary supplement in human nutrition. *Journal of Applied Phycology*, **22**, 265-276.
- GOSWAMI, R.K., MEHARIYA, S., VERMA, P. (2024) Advances in microalgae-based carbon sequestration: Current status and future perspectives. *Environmental Research*, **249**, 118397.

- GREENE, C.H., HUNTLEY, M.E., ARCHIBALD, I., GERBER, L.N., SILLS, D.L., GRANADOS, J., TESTER, J.W., BEAL, C.M., WALSH, M.J., BIDIGARE, R.R., BROWN, S.L., COCHLAN, W.P., JOHNSON, Z.I., LEI, X.G., MACHESKY, S.C., REDALJE, D.G., RICHARDSON, R.E., KIRON, V., CORLESS, V. (2016) Marine microalgae: Climate, energy, and food security from the sea. *Oceanography*, **29**, 10-15.
- GRÉGOIRE, M., OSCHLIES, A., CANFIELD, D., CASTRO, C., CIGLENEČKI, I., CROOT, P., SALIN, K., SCHNEIDER, B., SERRET, P., SLOMP, C.P., TESI, T., YÜCEL, M. (2023) Ocean Oxygen: the role of the Ocean in the oxygen we breathe and the threat of deoxygenation. In: RODRIGUEZ PEREZ, A., KELLETT, P., ALEXANDER, B., MUÑIZ PINIELLA, Á., VAN ELSLANDER, J., HEYMANS, J. J. (Szerk.): *Future Science Brief No. 10 of the European Marine Board*. Ostend, Belgium, pp. 4-8.
- GRIFFITHS, M.J., HARRISON, S.T. (2009) Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *Journal of Applied Phycology*, **21**, 493-507.
- GRIFFITHS, M.J., GARCIN, C., VAN HILLE, R.P., HARRISON, S.T. (2011) Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. *Journal of Microbiological Methods*, **85**, 119-123.
- GRÓSZ, J. (2021) Hazai állóvizek vízminőségi paramétereinek vizsgálata terepi és távérzékelési eszközökkel. Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, 146 pp.
- GRÓSZ, J., WALTNER, I., VEKERDY, Z. (2019) First analysis results of *in situ* measurements for algae monitoring in lake Naplás (Hungary). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **14**, 385–398.
- GRÓSZ, J., SEBŐK, A., WALTNER, I. (2022) Comparative study of laboratory Based chlorophyll-a determination methods. *Journal of Central European Green Innovation*, **10**, 25-34.
- GUDURU, R.K., GUPTA, A.A., DIXIT, U. (2022) Biological processes for CO₂ capture. In: KHALID, M., DHARASKAR, S.A., SIDDIQUI, H. (Szerk.): *Emerging carbon capture technologies*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, pp. 371-400.
- GUIDI, L., TATTINI, M., LANDI, M. (2017) How does chloroplast protect chlorophyll against excessive light. *Chlorophyll*, **21**, 21-36.
- GUIRY, M.D. (2012) How many species of algae are there? *Journal of Phycology*, **48**, 1057-1063.
- HAGEMANN, L.T., MCCARTNEY, M.M., FUNG, A.G., PEIRANO, D.J., DAVIS, C.E., MIZAIKOFF, B. (2018) Portable combination of Fourier transform infrared spectroscopy and differential mobility spectrometry for advanced vapor phase analysis. *Analyst*, **143**, 5683-5691.

- HAN, F.F., WANG, W.L., LI, Y.G., SHEN, G.M., WAN, M.X., WANG, J. (2013) Changes of biomass, lipid content and fatty acids composition under a light-dark cyclic culture of *Chlorellapyrenoidosa* in response to different temperature. *Bioresource Technology*, **132**, 182-189.
- HARTAI, É. (2012) Potential of CO₂ geological storage in porous sedimentary formations in North Hungary. *Geosciences and Engineering*, **1**, 129-138.
- HASZELDINE, R.S. (2009) Carbon capture and storage: How green can black be? *Science*, **325**, 5948.
- HAVLIK, I., REARDON, K.F., ÜNAL, M., LINDNER, P., PREDIGER, A., BABITZKY, A., BEUTEL, S., SCHEPER, T. (2013) Monitoring of microalgal cultivations with on-line, flow-through microscopy. *Algal Research*, **2**, 253-257.
- HAVLIK, I., BEUTEL, S., SCHEPER, T., REARDON, K.F. (2022) On-line monitoring of biological parameters in microalgal bioprocesses using optical methods. *Energies*, **15**, 875.
- HEISLER, J., GLIBERT, P. M., BURKHOLDER, J. M., ANDERSON, D. M., COCHLAN, W., DENNISON, W., GOBLER, C., DORTCH, Q., HEIL, C., HUMPHRIES, E., LEWITUS, A., MAGNIEN, R., MARSHALL, H., SELLNER, K., STOCKWELL, D., STOECKER, D., SUDDLESON, M. (2008). Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. *Harmful algae*, **8**, 3-13.
- HEMPEL, F., BOZARTH, A.S., LINDENKAMP, N., KLINGL, A., ZAUNER, S., LINNE, U., STEINBÜCHEL, A., MAIER, U.G. (2011) Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, **10**, 81.
- HEUBECK, S., CRAGGS, R., SHILTON, A. (2007) Influence of CO₂ scrubbing from biogas on the treatment performance of a high rate algal pond. *Water Science and Technology*, **55**, 193-200.
- HIRATA, T., TANAKA, M., OOIKE, M., TSUNOMURA, T., SAKAGUCHI, M. (2000) Antioxidant activities of phycocyanobilin prepared from *S. platensis*. *Journal of Applied Phycology*, **12**, 435-439.
- HO, S.H., CHEN, C.Y., LEE, D.J., CHANG, J.S. (2011). Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems - a review. *Biotechnology Advances*, **29**, 189-198.
- HODAI, Z. (2015) Alga biomassza kinyerése foto bioreaktorokban termesztett mikroalga szuszpenziókból. Doktori értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém, 189 pp.
- HU, W. (2014) Dry weight and cell density of individual algal and cyanobacterial cells for algae research and development. Master's thesis, University of Missouri-Columbia, Columbia, MO, USA, 68 pp.

- HUANG, Y., XIONG, W., LIAO, Q., FU, Q., XIA, A., ZHU, X., SUN, Y. (2016) Comparison of *Chlorella vulgaris* biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide. *Bioresource Technology*, **222**, 367-373.
- HUESEMANN, M.H., VAN WAGENEN, J., MILLER, T., CHAVIS, A., HOBBS, S., CROWE, B. (2013) A screening model to predict microalgae biomass growth in photobioreactors and raceway ponds. *Biotechnology and Bioengineering*, **110**, 1583-1594.
- HUISMAN, J.M. (2000) Marine plants of Australia. Australian biological resources study. Crawley, Australia: University of Western Australia Press, 312 pp.
- HUN-REN BLKI (2022) Zöldalga-tenyésztés kutatás. HUN-REN Balatoni Limnológiai Kutatóintézet. <https://www.blki.hun-ren.hu/node/15089>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- HUN-REN ÖK (2023) Algológiai Találkozó és Továbbképzés. HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont. <https://ecolres.hun-ren.hu/algologiai-talalkozo-es-tovabbkepzes/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- HUN-REN ÖK (2025a) Bácsiné Béres Viktória, PhD. HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont. <https://ecolres.hun-ren.hu/munkatarsak/bacsine-beres-viktoria/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- HUN-REN ÖK (2025b) Török-Krasznai Enikő, PhD. HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont. <https://ecolres.hun-ren.hu/munkatarsak/torok-krasznoi-eniko/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- HUN-REN ÖK (2025c) Abonyi András, PhD. HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont. <https://ecolres.hun-ren.hu/munkatarsak/abonyi-andras/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- HUNTZINGER, D.N., GIERKE, J.S., KAWATRA, S.K., EISELE, T.C., SUTTER, L.L. (2009) Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation. *Environmental Science & Technology*, **43**, 1986-1992.
- IBRAHIM, O.A., ABBAS, A., HASSANIN, A I., IBRAHIM, W., ABD-ELNABY, S.F.M. (2023) A literature review of bio-cement: microorganisms, production, properties, and potential applications. *ERU Research Journal*, **2**, 554-574.
- IEAGHG (2020) Future role of CCS technologies in the power sector. <https://ieaghg.org/publications/future-role-of-ccs-technologies-in-the-power-sector/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- IHNKEN, S., BEARDALL, J., KROMKAMP, J.C., SERRANO, C.G., TORRES, M.A., MASOJÍDEK, J., MALPARTIDA, I., ABDALA, R., GIL JEREZ, C., MALAPASCUA, J.R.F., NAVARRO, E., RICO, R.M., PERALTA, E., FERREIRA EZEQUIL, J.P., LOPEZ

- FIGUEROA, F. (2014) Light acclimation and pH perturbations affect photosynthetic performance in *Chlorella* mass culture. *Aquatic Biology*, **22**, 95-110.
- INMAN, M. (2008) Carbon is forever. *Nature Climate Change*, **1**, 156-158.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021a) World Energy Outlook 2021. Paris: IEA, 385 pp. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021b) Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- IPCC (2005) Carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srcs_wholereport-1.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- IRFAN, M.F., HOSSAIN, S.M.Z., KHALID, H., SADAF, F., AL-THAWADI, S., ALSHATER, A., HOSSAIN, M.M., RAZZAK, S.A. (2019) Optimization of bio-cement production from cement kiln dust using microalgae. *Biotechnology Reports*, **23**, E00356.
- ISO (1992) ISO 10260:1992 Water Quality – Measurement of biochemical parameters – Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration. Geneva: International Organization for Standardization, 6 pp.
- ISO (2016) ISO 7027-1:2016 Water Quality – Determination of turbidity. Geneva: International Organization for Standardization, 9 pp.
- JÄGER, K. (2005) Növényi növekedésszabályozó anyagokat (PGR) termelő algatörzsek, mint alternatív hormonforrások felhasználása magasabb rendű növények szövettenyésztéseiben. Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Mosonmagyaróvár, 141 pp.
- JAMES, C.M., AL-KHARS, A.M. (1990) An intensive continuous culture system using tubular photobio-reactors for producing microalgae. *Aquaculture*, **87**, 381-393.
- JAPAR, A.S., AZIS, N.M., TAKRIFF, M.S., YASIN, N.H.M. (2017) Application of different techniques to harvest microalgae. *Transactions on Science and Technology*, **4**, 98-108.
- JASSEY, V.E.J., WALCKER, R., KARDOL, P., GEISEN, S., HEGER, T., LAMENTOWICZ, M., HAMARD, S., LARA, E. (2022) Contribution of soil algae to the global carbon cycle. *The New phytologist*, **234**, 64-76.
- JE, S., YAMAOKA, Y. (2022) Biotechnological approaches for biomass and lipid production using microalgae *Chlorella* and its future perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **32**, 1357.

- JOHNSON, K.M., SIEBURTH, J.M., LEB WILLIAMS, P.J., BRÄNDSTRÖM, L. (1987) Coulometric total carbon dioxide analysis for marine studies: Automation and calibration. *Marine Chemistry*, **21**, 117-133.
- JOSEPH, J., RAY, J.G. (2024) A critical review of soil algae as a crucial soil biological component of high ecological and economic significance. *Journal of Phycology*, **60**, 229-253.
- JUHÁSZ, L., VÁRI, A., SZALKA, É., MOLNÁR, Z. (2018) Az alga-kutatások irányai–nemzetközi kitekintés. *Acta Agronomica Óváriensis*, **59**, 125-140.
- JUNEJA, A., CEBALLOS, R.M., MURTHY, G.S. (2013) Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: A review. *Energies*, **6**, 4607-4638.
- JYOTHI, K., KRISHNA PRASAD, M., MOHAN NARASIMHA RAO, G. (2016) Algae in fresh water ecosystem. *Phykos*, **46**, 25–31.
- KÁDÁR, I. (1998) Kármentesítési Kézikönyv 2. A szennyezett talajok vizsgálatáról. Budapest: Környezetvédelmi Minisztérium. 152 pp.
- KANG, J.-J., MIN, J.-O., KIM, Y., LEE, C.-H., YOO, H., JANG, H.-K., KIM, M.-J., OH, H.-J., LEE, S.-H. (2021) Vertical distribution of phytoplankton community and pigment production in the Yellow Sea and the East China Sea during the late summer season. *Water*, **13**, 3321.
- KAINER, D. (2018) Microalgae protocols. *International space station (ISS) mission: Microalgae. National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/microalgaeprotocols_508.pdf
Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- KAO, C., CHIU, S., HUANG, T., DAI, L., HSU, L., LIN, C. (2012) Ability of a mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. *Applied Energy*, **93**, 176-183.
- KAWAGUCHI, K. (1980) Microalgae production systems in Asia. In: SHELEF, G., SOEDER, C.J. (Szerk.): *Algae Biomass*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/North-Holland Biomedical Press, pp. 25-33.
- KENDIRLIOGLU, G., CETIN, A.K. (2017) Effect of different wavelengths of light on growth, pigment content and protein amount of *Chlorella vulgaris*. *Fresenius Environmental Bulletin*, **26**, 7974-7980.
- KHAN, M.I., SHIN, J.H., KIM, J.D. (2018) The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, **17**, 36.

KIANG, N.Y. (2008) The color of plants on other worlds.

<https://www.scientificamerican.com/article/the-color-of-plants-on-other-worlds/>.

Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

KISS, B. (2024) Mikroalga tenyésztési és detektálási módszerek kialakítása, fejlesztése. Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 115 pp.

KIM, D.G., LEE, C., PARK, S.M., CHOI, Y.E. (2014) Manipulation of light wavelength at appropriate growth stage to enhance biomass productivity and fatty acid methyl ester yield using *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, **159**, 240-248.

KLÁTYIK, SZ. (2021) Mezőgazdasági eredetű kémiai szennyezők ökotoxikológiai vizsgálatai alacsonyabb rendű vízi szervezeteken. Doktori értekezés, Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem, Gödöllő, 170 pp.

KLEBERCZ, O., BÖRÖNDI, T., MAGOS, Z., FEIGL, V., UZINGER, N., GRUIZ, K. (2013) Scale-up experiments for composing cultivation media from degraded soils and waste amendments. Proceedings of the AquaConSoil Conference, Barcelona, Spain. https://xn--krinfo-wxa.hu/sites/default/files/2345paper_long_Klebercz.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

KNOLL, A.H. (2003) Life on a young planet: The first three billion years of evolution on Earth. Princeton, USA: Princeton University Press, 288 pp.

KOCH, R., SAILER, G., PACZKOWSKI, S., PELZ, S., POETSCH, J., MÜLLER, J. (2021) Lab-scale carbonation of wood ash for CO₂-sequestration. *Energies*, **14**, 7371.

KOERNER, B., KLOPATEK, J. (2002) Anthropogenic and natural CO₂ emission sources in an arid urban environment. *Environmental Pollution*, **116**, 45-51.

KÓKAI, ZS. (2021) A környezeti szélsőségek, a természetvédelmi oltalom és a területhasznosítás szerepe a kovaalga jellegek közösségszintű változásában. Doktori értekezés, Debreceni Egyetem, Debrecen, 101 pp.

KONG, W., KONG, J., MA, J., LYU, H., FENG, S., WANG, Z., YUAN, P., SHEN, B. (2021) *Chlorella vulgaris* cultivation in simulated wastewater for the biomass production, nutrients removal and CO₂ fixation simultaneously. *Journal of Environmental Management*, **284**, 112070.

KOŻUCH, A., CYWICKA, D., ADAMOWICZ, K., WIERUSZEWSKI, M., WYSOCKA-FIJOREK, E., KIEŁBASA, P. (2023) The use of forest biomass for energy purposes in selected European countries. *Energies*, **16**, 5776.

- KRETSCHMER, P., PULZ, O., GUDIN, C., SEMENENKO, V. (1995) Biotechnology of microalgae. *Proceedings of the Second European Workshop*, Potsdam-Rehbrücke, Germany.
- KROGMANN, D. (2004). Discoveries in oxygenic photosynthesis (1727-2003): a perspective. *Photosynthesis Research*, **80**, 15.
- KSH (2025) Légszennyező anyagok és üvegházhatású gázok kibocsátása. https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0017.html. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- KUO, C.M., LIN, T.H., YANG, Y.C., ZHANG, W.X., LAI, J.T., WU, H.T., CHANG, J.S., LIN, C.S. (2017) Ability of an alkali-tolerant mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. AT1 to capture carbon dioxide for increasing carbon dioxide utilization efficiency. *Bioresource Technology*, **244**, 243-251.
- LAKATOS, P.P. (1999) Természetes baktérium populációk növekedési dinamikájának modellezése. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 44 pp.
- LAKATOS, G. (2015) Bakteriális partnerek által elősegített fotofermentatív hidrogéntermelés *Chlamydomonas* algában. Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem, Szeged.
- LANE, N. (2015) The unseen world: reflections on Leeuwenhoek (1677) ‘Concerning little animals’. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **370**, 20140344.
- LARKUM, A.W., DOUGLAS, S., RAVEN, J.A. (Szerk.) (2003) Photosynthesis in algae. Dordrecht, Netherlands: Springer Dordrecht, 480 pp.
- LAU, L.C., LEE, K.T., MOHAMED, A.R. (2012) Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto protocol to the Copenhagen accord - a comment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 5280-5284.
- LAVENS, P., SORGELOOS, P. (1996) Manual on the production and use of live food for aquaculture. Rome: FAO, 295 pp.
- LÁZÁR, D., TAKÁCS, E., MÖRTL, M., KLÁTYIK, SZ., BARÓCSI, A., KOCSÁNYI, L., LENK, S., DOMJÁN, L., SZARVAS, G., LENGYEL, E., SZÉKÁCS, A. (2023) Application of a fluorescence-based instrument prototype for chlorophyll measurements and its utility in an herbicide algal ecotoxicity assay. *Water*, **15**, 1866.
- LEITE, G.B., HALLENBECK, P.C. (2012) Algae oil. In: HALLENBECK, P.C. (Szerk.): *Microbial technologies in advanced biofuels production*. New York, USA: Springer, pp. 231-259.
- LEONG, Y.K., CHANG, J.S. (2020) Bioremediation of heavy metals using microalgae: recent advances and mechanisms. *Bioresource Technology*, **303**, 122886.

- LE QUÉRÉ, C., JACKSON, R.B., JONES, M.W., SMITH, A.J., ABERNETHY, S., ANDREW, R.M., PETERS, G.P. (2020) Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, **10**, 647-653.
- LI, G., YAO, J. (2024) A review of algae-based carbon capture, utilization, and storage (algae-Based CCUS). *Gases*, **4**, 468-503.
- LI, L., YU, H., PUXTY, G., ZHOU, S., CONWAY, W., FERON, P. (2024) Integrated CO₂ capture and mineralization based on monoethanolamine and Lime Kiln Dust. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **63**, 16019-16028.
- LIANG, F., WEN, X., GENG, Y., OUYANG, Z., LUO, L., LI, Y. (2013) Growth rate and biomass productivity of *Chlorella* as affected by culture depth and cell density in an open circular photobioreactor. *Journal of microbiology and Biotechnology*, **23**, 539-544.
- LIANG, F., YA, Q., DU, W.C., WEN, X.B., GENG, Y.H., LI, Y.G. (2014) The relationships between optical density, cell number, and biomass (dry weight) of four microalgae. *Acta Ecologica Sinica*, **34**, 6156-6163.
- LIN, L.-P. (2005) *Chlorella: its ecology structure cultivation bioprocess and application*. Taipei City, Taiwan: Yi Hsien Publishing Company. 596 pp.
- LIU, Z., CIAIS, P., DENG, Z., LEI, R., DAVIS, S.J., FENG, S., SCHELLNHUBER, H.J. (2020) Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, **11**, 5172.
- LOBUS, N.V. (2022) Biogeochemical role of algae in aquatic ecosystems: Basic research and applied biotechnology. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, 1846.
- LOPES, A.P., SANTOS, F.M., SILVA, T.F., VILAR, V.J., PIRES, J.C. (2020) Outdoor cultivation of the microalga *Chlorella vulgaris* in a new photobioreactor configuration: The effect of ultraviolet and visible radiation. *Energies*, **13**, 1962.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.F., KEAN-MENG, T., ASECIO-ALCUDIA, G.G., ASYRAF-KASSIM, M., ALVAREZ-GONZÁLEZ, C.A., MÁRQUEZ-ROCHA, F.J. (2022) Sustainable microalgae and cyanobacteria biotechnology. *Applied Sciences*, **12**, 6887.
- LU, Y., TUO, Y., ZHANG, L., HU, X., HUANG, B., CHEN, M., LI, Z. (2023) Vertical distribution rules and factors influencing phytoplankton in front of a drinking water reservoir outlet. *Science of The Total Environment*, **902**, 166512.
- LYONS, T.W., REINHARD, C.T., PLANAVSKY, N.J. (2014) The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, **506**, 307-315.

- MADEIRA, M.S., CARDOSO, C., LOPES, P.A., COELHO, D., AFONSO, C., BANDARRA, N.M., PRATES, J.A. (2017) Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review. *Livestock Science*, **205**, 111-121.
- MAHLANGU, D., MPHAHLELE, K., DE PAOLA, F., MTHOMBENI, N.H. (2024) Microalgae-mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater: a review. *Water*, **16**, 718.
- MANDALAM, R.K., PALSSON, B. (1998) Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. *Biotechnology and bioengineering*, **59**, 605-611.
- MANN, G., SCHLEGEL, M., SCHUMANN, R., SAKALAIUSKAS, A. (2009) Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research*, **7**, 33-38.
- MARUYAMA, I., NAKAO, T., SHIGENO, I., ANDO, Y., HIRAYAMA, K. (1997) Application of unicellular algae *Chlorella vulgaris* for the mass-culture of marine rotifer *Brachionus*. *Hydrobiologia*, **358**, 133-138.
- MATOS, Â.P., FERREIRA, W.B., MORIOKA, L.R.I., MOECKE, E.H.S., FRANÇA, K.B., SANT'ANNA, E.S. (2018) Cultivation of *Chlorella vulgaris* in medium supplemented with desalination concentrate grown in a pilot-scale open raceway. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **35**, 1183-1192.
- MAYER, P., CUHEL, R., NYHOLM, N. (1997) A simple in vitro fluorescence method for biomass measurements in algal growth inhibition tests. *Water Research*, **31**, 2525-2531.
- MELO, M., FERNANDES, S., CAETANO, N., BORGES, M.T. (2018) *Chlorella vulgaris* (SAG 211-12) biofilm formation capacity and proposal of a rotating flat plate photobioreactor for more sustainable biomass production. *Journal of Applied Phycology*, **30**, 887-899.
- MÉSZÁROS, M., KÖLES, P. (2013) Alga hasznosításának lehetőségei, termesztés technológiái, *Őstermelő - Gazdálkodók lapja*, **5**, 46-48
- METSOVITI, M.N., PAPAPOLYMEROU, G., KARAPANAGIOTIDIS, I.T., KATSOULAS, N. (2019) Effect of light intensity and quality on growth rate and composition of *Chlorella vulgaris*. *Plants*, **9**, 31.
- METTING JR, F.B. (1996) Biodiversity and application of microalgae. *Journal of Industrial Microbiology*, **17**, 477-489.
- MICROBIAL LIFE (2006) Red Tide - General Collection.
<https://serc.carleton.edu/microbelife/topics/redtide/general.html>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- MIDDLETON, R.S., OGLAND-HAND, J D., CHEN, B., BIELICKI, J.M., ELLETT, K.M., HARP, D.R., KAMMER, R.M. (2020) Identifying geologic characteristics and operational decisions to meet global carbon sequestration goals. *Energy & Environmental Science*, **13**, 5000-5016.
- MILINOVIC, J., MATA, P., DINIZ, M., NORONHA, J.P. (2021) Umami taste in edible seaweeds: The current comprehension and perception. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, **23**, 100301.
- MIRZAHOSSEINI, A., NOSZÁL, B. (2016) Species-specific standard redox potential of thiol-disulfide systems: A key parameter to develop agents against oxidative stress. *Scientific Reports*, **6**, 37596.
- MOBIN, S., ALAM, F. (2017) Some promising microalgal species for commercial applications: a review. *Energy Procedia*, **110**, 510-517.
- MOHANTY, A.K., VIVEKANANDHAN, S., DAS, O., ROMERO MILLÁN, L.M., KLINGHOFFER, N.B., NZIHO, A., MISRA, M. (2024) Biocarbon materials. *Nature Reviews Methods Primers*, **4**, 19.
- MOKKA (2018) Szakolyi pernye. <https://mokkka.hu/node/1021>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- MOLINA GRIMA, E., BELARBI, E.-H., ACIÉN FERNÁNDEZ, F.G., ROBLES MEDINA, A., CHISTI, Y. (2003) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, **20**, 491-515.
- MOLNÁR V, A., CSÁNYI, B., VIDÉKI, R., BAUER, N., DOLÁNSZKY, F., PAPP, V.G., NÓTÁRI, K., BUCZKÓ, K., GULYÁS, P., VIRÓK, V. (2017) Felföldy Lajos (1920-2016). *Kitaibelia*, **22**, 3-25.
- MÓNOK, D., FÜLEKY, G. (2017) A talaj kadmium szennyezettségének vizsgálata angolperje (*Lolium perenne* L.) bioteszttel. *Agrokémia és Talajtan*, **66**, 333-347.
- MONTEMEZZANI, V., DUGGAN, I.C., HOGG, I.D., CRAGGS, R.J. (2015) A review of potential methods for zooplankton control in wastewater treatment High Rate Algal Ponds and algal production raceways. *Algal Research*, **11**, 211-226.
- MSZ (1978) MSZ 08-0206-2:1978 – A talaj egyes kémiai tulajdonságainak vizsgálata. Laboratóriumi vizsgálatok. (pH-érték, szódában kifejezett fenolftalein lúgosság, vízben oldható összes só, hidrolitos (y_1 -érték) és kicserélődési aciditás (y_2 -érték)). Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.

- MSZ ISO (1993) MSZ ISO 10260:1993 Vízminőség. A biokémiai paraméterek mérése. Az a-klorofillkoncentráció spektrofotometriás meghatározása. Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.
- MUTSCHLECHNER, M., WALTER, A., COLLESELLI, L., GRIESBECK, C., SCHÖBEL, H. (2022) Enhancing carotenogenesis in terrestrial microalgae by UV-A light stress. *Journal of Applied Phycology*, **34**, 1943-1955.
- NAGY, B.J. (2023) *Algaalapú mezőgazdasági ágensek technológiaközpontú fejlesztése*. Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 114 pp.
- NAMIKOSHI, M. (1996) Bioactive compounds produced by cyanobacteria. *Journal of Industrial Microbiology*, **17**, 373-384.
- NARALA, R.R., GARG, S., SHARMA, K.K., THOMAS-HALL, S.R., DEME, M., LI, Y., SCHENK, P.M. (2016) Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. *Frontiers in Energy Research*, **4**, 29.
- NASA (2024) Microalgae Protocols. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/12/microalgaeprotocols_508.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (2024) During a year of extremes, carbon dioxide levels surge faster than ever. <https://www.noaa.gov/news-release/during-year-of-extremes-carbon-dioxide-levels-surge-faster-than-ever>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- NAYAKA, S., TOPPO, K., VERMA, S. (2017) Adaptation in algae to environmental stress and ecological conditions. In: SHUKLA, V., KUMAR, S., KUMAR, N. (Szerk.): *Plant Adaptation Strategies in Changing Environment*. Singapore: Springer, pp. 103-115.
- NGUY-ROBERTSON, A., LI, L., TEDESCO, L.P., WILSON, J.S., SOYEUX, E. (2013) Determination of absorption coefficients for chlorophyll a, phycocyanin, mineral matter and CDOM from three central Indiana reservoirs. *Journal of Great Lakes Research*, **39**, 151-160.
- NGUYEN, M.-N., LIN, C., NGUYEN, H.-L., LE, V.-G., HADDOUT, S., UM, M.-J., CHANG, S.W., NGUYEN, D.D. (2023) Ecotoxicity of micro- and nanoplastics on aquatic algae: Facts, challenges, and future opportunities. *Journal of Environmental Management*, **346**, 118982.
- NICHOLS, K., OLSON, M., AYERS, A. D. (2020) Microalgae as a beneficial soil amendment. <https://myland.ag/wp-content/uploads/MyLand-Microalgae-White-Paper-nov2020.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- NICKELSEN, K. (2007) Otto Warburg's first approach to photosynthesis. *Photosynthesis research*, **92**, 109-120.
- NICKELSEN, K. (2009) The construction of a scientific model: Otto Warburg and the building block strategy. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, **40**, 73-86.
- NIELSEN, E.S., WILLEMOES, M. (1966) The influence of CO₂ concentration and pH on two *Chlorella* species grown in continuous light. *Physiologia Plantarum*, **19**, 279-293.
- NKFI-EPR (2016) Economical production of algae-based biomass and its utilization in renewable energy production (Alga alapú biomassza gazdaságos előállítása és megújuló energetikai hasznosítása) OTKA pályázat. <http://nyilvanos.otka-palyazat.hu/index.php?menuid=930&lang=EN&num=121085>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- NORTON, T.A., MELKONIAN, M., ANDERSEN, R.A. (1996) Algal biodiversity. *Phycologia*, **35**, 308-326.
- ODZIJEWICZ, J.I., WOŁEJKO, E., WYDRO, U., WASIL, M., JABŁOŃSKA-TRYPUĆ, A. (2022) Utilization of ashes from biomass combustion. *Energies*, **15**, 9653.
- OMLC (2006) Chlorophyll a <https://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/122.html>
Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- ONEN CINAR, S., CHONG, Z.K., KUCUKER, M.A., WIECZOREK, N., CENGİZ, U., KUÇTA, K. (2020) Bioplastic production from microalgae: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, 3842.
- OSWALD, W.J. (1980) Integrated systems for community waste management. In: Chung (Szerk.): *Proceed. Internat. Symp. Biogas, Microalgae and Livestock Wastes*, Taipei, Taiwan.
- OSWALD, W.J., GOTAAS, H.B. (1957) Photosynthesis in sewage treatment. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **122**, 73-97.
- ÖRDÖG, V. (1981) Contributions to the standardization of laboratory alga tests. *Botanikai Közlemények*, **68**, 85-93.
- ÖRDÖG, V., SZIGETI, J., PULZ, O. (1996) Growth of *Arthonema africanum* and *Bacillus thuringiensis* in domestic sewage an estimation of their cytokinin-like activity by bioassay. In: SZALKA, É. (Szerk.): *Proceedings of the Conference on "Progress in Plant Sciences from Plant Breeding to Growth Regulation"*. Mosonmagyaróvár: Pannon University of Agricultural Sciences-IGV, Institute für Getreideverarbeitung GmbH, pp. 143-148.
- ÖRDÖG, V., STIRK, W.A., BÁLINT, P., AREMU, A.O., OKEM, A., LOVÁSZ, CS., MOLNÁR, Z., VAN STADEN, J. (2016) Effect of temperature and nitrogen concentration on lipid

- productivity and fatty acid composition in three *Chlorella* strains. *Algal Research*, **16**, 141-149.
- PABST, W. (1978) Nutritional evaluation of nonsewage microalgae by the rat balance method. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte. Ergebnisse der Limnologie*, **11**, 65-70.
- PADISÁK, J., ISTVÁNOVICS, V. (1995) Hogyan magyarázhatók a rendszertelen *Cylindrospermopsis raciborskii* tömegprodukciók a Balatonban-egy nullhipotézis. 37. *Hidrobiológus Napok*, Tihany, (pp. 41-44).
- PAERL, H. (2008) Nutrient and other environmental controls of harmful cyanobacterial blooms along the freshwater - marine continuum. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, **619**, 217-37.
- PÁL, KÁROLYNÉ (2006) Különleges műanyagok az orvostechnika szolgálatában. <https://quattroplast.hu/wp-content/uploads/2023/05/0602-2.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- PANAHI, Y., PISHGOO, B., JALALIAN, H.R., MOHAMMADI, E., TAGHIPOUR, H.R., SAHEBKAR, A. (2012) Investigation of the effects of *Chlorella vulgaris* supplementation in patients with non-alcoholic fatty liver disease: A randomized clinical trial. *Hepatogastroenterology*, **59**, 2099-2103.
- PAULIK, K. (2012) A sokoldalú alga. https://mail.innoteka.hu/cikk/a_sokoldal_u_alga.427.html. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- PEREZ, S., ETANCELIN, J. M., PONCET, P. (2024) A semi-Lagrangian method for the direct numerical simulation of crystallization and precipitation at the pore scale. *Frontiers in Earth Science*, **13**, 1493305.
- PESHEVA, I., KODAMA, M., DIONISIO-SESE, M.L., MIYACHI, S. (1994) Changes in photosynthetic characteristics induced by transferring air-grown cells of *Chlorococcum littorale* to high-CO₂ conditions. *Plant and Cell Physiology*, **35**, 379-387.
- PÉTERFI, I. (1977) Az algák biológiája és gyakorlati jelentősége. Bukarest, Románia: Ceres Könyvkiadó, 234 pp.
- PETERS, G.P., LE QUÉRÉ, C., ANDREW, R.M., CANADELL, J.G., FRIEDLINGSTEIN, P., ILYINA, T., TANS, P. (2017) Towards real-time verification of CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, **7**, 848-850.
- PETERSON, J. (2019) Confessions of an anthropogenic global warming fatalist. RealClear Energy. https://www.realclearenergy.org/articles/2019/08/30/confessions_of_an_anthropogenic_global_warming_fatalist.html. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- PHYCOM (2024) Phycom. <https://phycom.eu/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- PICCARDI, R., MATERASSI, R., TREDICI, M. (1999) Algae and human affairs in the 21st century. *Abstracts of International Conference on Applied Algology*, Firenze, Italy.
- PIRIE, N.W. (1975) The *Spirulina* algae. In: PIRIE, N.W. (Szerk.): Food protein sources. New York, USA: Cambridge University Press, pp. 33-39.
- PISMENSKAYA, N., LAKTIONOV, E., NIKONENKO, V., EL ATTAR, A., AUCLAIR, B., POURCELLY, G. (2001) Dependence of composition of anion-exchange membranes and their electrical conductivity on concentration of sodium salts of carbonic and phosphoric acids. *Journal of Membrane Science*, **181**, 185-197.
- POPPER, Z.A., TUOHY, M.G. (2010) Beyond the green: understanding the evolutionary puzzle of plant and algal cell walls. *Plant physiology*, **153**, 373-383.
- POŘÍZKA, P., PROCHAZKOVÁ, P., PROCHAZKA, D., SLÁDKOVÁ, L., NOVOTNÝ, J., PETRILAK, M., BRADA, M., SAMEK, O., PILÁT, Z., ZEMÁNEK, P., ADAM, V., KIZEK, R., NOVOTNÝ, K., KAISER, J. (2014) Algal biomass analysis by laser-based analytical techniques - a review. *Sensors*, **14**, 17725-17752.
- POWERS, L. (2015) Toxic algae blooms: What you should know about the mysterious phenomena. <https://www.cbc.ca/news/science/toxic-algae-blooms-what-you-should-know-about-the-mysterious-phenomena-1.3117687>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- PRABAKARAN, G., MOOVENDHAN, M., ARUMUGAM, A., MATHARASI, A., DINESHKUMAR, R., SAMPATHKUMAR, P. (2019) Evaluation of chemical composition and *in vitro* antiinflammatory effect of marine microalgae *Chlorella vulgaris*. *Waste Biomass Valor*, **10**, 3263-3270.
- PRASAD, R., GUPTA, S.K., SHABNAM, N., OLIVEIRA, C.Y.B., NEMA, A.K., ANSARI, F.A., BUX, F. (2021) Role of microalgae in global CO₂ sequestration: Physiological mechanism, recent development, challenges, and future prospective. *Sustainability*, **13**, 13061.
- PREISIG, H.R., ANDERSEN, R.A. (2005) Historical review of algal culturing techniques. In: ANDERSEN, R.A. (Szerk.): *Algal Culturing Techniques*. Cambridge, MA, USA: Academic Press, pp. 1-12.
- PULZ, O. (2001) Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **57**, 287-293.
- PULZ, O., GROSS, W. (2004) Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **65**, 635-648.

- PULZ, O., SCHEIBENBOGEN, K., GROß, W. (2008) Biotechnology with cyanobacteria and microalgae In: REHM, H.-J. (Szerk.): *Biotechnology: Special Processes*, Volume 10, Second Edition. Hoboken, USA: Wiley-Blackwell, 622 pp.
- QIN, S., WANG, K., GAO, F., GE, B., CUI, H., LI, W. (2023) Biotechnologies for bulk production of microalgal biomass: from mass cultivation to dried biomass acquisition. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, **16**, 131.
- RADMER, R.J. (1996) Algal diversity and commercial algal products. *Bioscience*, **46**, 263-270.
- RAHMAN, A., MILLER, C.D. (2017) Microalgae as a source of bioplastics. In: RASTOGI, R.P., MADAMWAR, D., PANDEY, A. (Szerk.) *Algal green chemistry*. Netherlands: Elsevier, pp. 121-138.
- RAIHAN, A., TUSPEKOVA, A. (2022) Dynamic impacts of economic growth, energy use, urbanization, tourism, agricultural value-added, and forested area on carbon dioxide emissions in Brazil. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **12**, 794-814.
- RAMÍREZ-LÓPEZ, C., PERALES-VELA, H.V., FERNÁNDEZ-LINARES, L. (2019) Biomass and lipid production from *Chlorella vulgaris* UTEX 26 cultivated in 2 m³ raceway ponds under semicontinuous mode during the spring season. *Bioresource Technology*, **274**, 252-260.
- RATOMSKI, P., HAWROT-PAW, M., KONIUSZY, A. (2021) Utilisation of CO₂ from sodium bicarbonate to produce *Chlorella vulgaris* biomass in tubular photobioreactors for biofuel purposes. *Sustainability*, **13**, 9118.
- RAUPACH, M.R., MARLAND, G., CIAIS, P., LE QUERE, C., CANADELL, J.G., KLEPPER, G., FIELD, C.B. (2007) Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 10288-10293.
- RAUPACH, M.R., GLOOR, M., SARMIENTO, J.L., CANADELL, J.G., FRÖLICHER, T.L., GASSER, T., TRUDINGER, C.M. (2014) The declining uptake rate of atmospheric CO₂ by land and ocean sinks. *Biogeosciences*, **11**, 3453-3475.
- RAUT, N., AL-BALUSHI, T., PANWAR, S., VAIDYA, R. S., SHINDE, G. B. (2015) Microalgal biofuel. In: BIERNAT, K. (Szerk): *Biofuels-Status and Perspective*. London, UK: Intech Open, pp 101-40.
- RAY, R.L., SINGH, V.P., SINGH, S.K., ACHARYA, B.S., HE, Y. (2022) What is the impact of COVID-19 pandemic on global carbon emissions? *Science of The Total Environment*, **816**, 151503.

- RAZZAK, S.A., ALI, S.A.M., HOSSAIN, M.M., MOUANDA, A.N. (2016) Biological CO₂ fixation using *Chlorella vulgaris* and its thermal characteristics through thermogravimetric analysis. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **39**, 1651-1658.
- REHM, E., DALGLEISH, F., HUOT, M., LAGUNAS-MORALES, J., LAMBERT-GIRARD, S., MATTEOLI, S., PICHÉ, M. (2018) Comparing fluorescent and differential absorption LiDAR techniques for detecting algal biomass with applications to Arctic substrates. *Proceedings SPIE 10631, Ocean Sensing and Monitoring X*, (pp. 288-302).
- REN, H., TUO, J., ADDY, M.M., ZHANG, R., LU, Q., ANDERSON, E., CHEN, P., RUAN, R. (2017) Cultivation of *Chlorella vulgaris* in a pilot-scale photobioreactor using real centrate wastewater with waste glycerol for improving microalgae biomass production and wastewater nutrients removal. *Bioresource Technology*, **245**, 1130-1138.
- RENAUD, S.M., PARRY, D.L., LUONG-VAN, T. (1994) Microalgae for use in tropical aquaculture. I. Gross chemical and fatty acid composition of twelve species of microalgae from the Northern Territory, Australia. *Journal of Applied Phycology*, **6**, 337-345.
- RIBEIRO RODRIGUES, L.H., ARENZON, A., RAYA-RODRIGUEZ, M.T., FERREIRA FONTOURA, N. (2011) Algal density assessed by spectrophotometry: A calibration curve for the unicellular algae *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, **3**, 225-228.
- RICHARDSON, B., ORCUTT, D., SCHWERTNER, H., MARTINEZ, C.L., WICKLINE, H.E. (1969) Effects of nitrogen limitation on the growth and composition of unicellular algae in continuous culture. *Applied Microbiology*, **18**, 245-250.
- RICHMOND, A. (1986) Microalgae of economic potential. In: RICHMOND, A. (Szerk.): *Handbook of microalgal mass culture*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc, pp. 199-243.
- RICHMOND, A. (2004) *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 566 pp.
- RIVAS, S., URRACA, R., BERTOLDI, P., THIEL, C. (2021) Towards the EU Green Deal: Local key factors to achieve ambitious 2030 climate targets. *Journal of Cleaner Production*, **320**, 128878.
- RONGA, D., BIAZZI, E., PARATI, K., CARMINATI, D., CARMINATI, E., TAVA, A. (2019) Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, **9**, 192.
- ROSKO, J.J., RACHLIN, J.W. (1977) The effect of cadmium, copper, mercury, zinc and lead on cell division, growth, and chlorophyll a content of the Chlorophyte *Chlorella vulgaris*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, **104**, 226-233.

- ROSZKOS, R. (2023) Az n-3 zsírsavak hatásainak vizsgálata nagy teljesítményű kocák szaporodásbiológiai paramétereire. Doktori értekezés, Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem, Gödöllő, 109 pp.
- RUBIN, E.S., DAVISON, J.E., HERZOG, H.J. (2015) The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **40**, 378-400.
- SACRAMENTO, M.M., BORGES, J., CORREIA, F.J., CALADO, R., RODRIGUES, J.M., PATRÍCIO, S.G., MANO, J.F. (2022) Green approaches for extraction, chemical modification and processing of marine polysaccharides for biomedical applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, 1041102.
- SADVAKASOVA, A.K., KOSSALBAYEV, B.D., BAUENOVA, M.O., BALOUCH, H., LEONG, Y.K., ZAYADAN, B.K., ALLAKHVERDIEV, S.I. (2023) Microalgae as a key tool in achieving carbon neutrality for bioproduct production. *Algal Research*, **72**, 103096.
- SAFI, C., ZEBIB, B., MERAH, O., PONTALIER, P. Y., VACA-GARCIA, C. (2014) Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **35**, 265-278.
- SAKHAROVA, E., KRYLOV, A.V., SABITOVA, R.Z., TSVETKOV, A.I., GAMBARYAN, L.R., MAMYAN, A.S., GABRIELIAN, B.K., HAYRAPETYAN, A.H., KHACHIKYAN, T.G. (2020) Horizontal and vertical distribution of phytoplankton in the Alpine Lake Sevan (Armenia) during the Summer Cyanoprokaryota Bloom. *Contemporary Problems of Ecology*, **13**, 60-70.
- SALIH, F.M. (2011) Microalgae tolerance to high concentrations of carbon dioxide: a review. *Journal of Environmental Protection*, **2**, 648.
- SANSAWA, H., ENDO, H. (2004) Production of intracellular phytochemicals in *Chlorella* under heterotrophic conditions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **98**, 437-444.
- SANTILLAN, C. (1982) Mass production of *Spirulina*. *Experientia*, **38**, 40-43.
- SANTOS-BALLARDO, D.U., ROSSI, S., HERNÁNDEZ, V., VÁZQUEZ GÓMEZ, R., DEL CARMEN RENDÓN-UNCETA, M., CARO-CORRALES, J., VALDEZ-ORTIZ, A. (2015) A simple spectrophotometric method for biomass measurement of important microalgae species in aquaculture. *Aquaculture*, **448**, 87-92.
- SAPIENTIA (2021) Curriculum Vitae – Fodorpataki László.
[https://ms.sapientia.ro/content/content_photos/Karok/MS/Tansz%C3%A9kek/KMT/CV/CV%20Fodorpataki%20Laszlo%202021%20\(HU\).pdf](https://ms.sapientia.ro/content/content_photos/Karok/MS/Tansz%C3%A9kek/KMT/CV/CV%20Fodorpataki%20Laszlo%202021%20(HU).pdf). Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- SARKER, N.K., KAPARAJU, P. (2023) A critical review on the status and progress of microalgae cultivation in outdoor photobioreactors conducted over 35 years (1986-2021). *Energies*, **16**, 3105.
- SCHAFFER, J.D., SEBETICH, M.J. (2004) Effects of aquatic herbicides on primary productivity of phytoplankton in the laboratory. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **72**, 1032-1037.
- SCHAGERL, M., SIEDLER, R., KONOPÁČOVÁ, E., ALI, S.S. (2022) Estimating biomass and vitality of microalgae for monitoring cultures: A roadmap for reliable measurements. *Cells*, **11**, 2455.
- SCHRECKENBACH, K., THÜRMER, C., LOEST, K., TRÄGER, G., HAHLOWEG, R. (2001) Der Einfluss von Mikroalgen (*Spirulina platensis*) in Trockenmischfutter auf Karpfen (*Cyprinus carpio*). *Fischer Teichwirt*, **1**, 10-13.
- SEAWEEED (2025) Seaweed E-numbers. <https://www.seaweed.ie/additives/e-number.php>.
Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- SEELY, G.R., JENSEN, R.G. (1965) Effect of solvent on the spectrum of chlorophyll. *Spectrochimica acta*, **21**, 1835-1845.
- SELLNER, K. G., DOUCETTE, G. J., KIRKPATRICK, G. J. (2003) Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, **30**, 383-406.
- SETO, K.C., GÜNERALP, B., HUTYRA, L.R. (2012) Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 16083-16088.
- SHAKOOR, A., SHAKOOR, S., REHMAN, A., ASHRAF, F., ABDULLAH, M., SHAHZAD, S.M., FAROOQ, T.H., ASHRAF, M., MANZOOR, M.A., ALTAF, M.M., ALTAF, M.A. (2021) Effect of animal manure, crop type, climate zone, and soil attributes on greenhouse gas emissions from agricultural soils - a global meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, **278**, 124019.
- SHIFRIN, N.S. (1984) Oils from microalgae. In: RATLEDGE, C., DAWSON, P., RATTRAY, J. (Szerk.): *Biotechnology for the oils and fats industry*. Urbana, USA: American Oil Chemists' Society, pp. 145-162.
- SHIRAIWA, Y., GOYAL, A., TOLBERT, N.E. (1993) Alkalization of the medium by unicellular green algae during uptake dissolved inorganic carbon. *Plant and Cell Physiology*, **34**, 649-657.

- SHUBERT, B.D., LARSEN, B.D., JOHNSON, P.D. (1985) Nutritional values of *Spirulina* and *Chlorella* for human consumption. *Annual Meeting of the Phycological Society of America*, New York, USA.
- SILVA, A., FIGUEIREDO, S.A., SALES, M.G., DELERUE-MATOS, C. (2009) Ecotoxicity tests using the green algae *Chlorella vulgaris* – a useful tool in hazardous effluents management. *Journal of Hazardous Materials*, **167**, 179-185.
- SINGH, U.B., AHLUWALIA, A.S. (2013) Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **18**, 73-95.
- SINGH, R. N., & SHARMA, S. (2012) Development of suitable photobioreactor for algae production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2347-2353.
- SINGH, S.P., SINGH, P. (2015) Effect of temperature and light on the growth of algae species: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **50**, 431-444.
- SIRIKULRAT, K., KOONAPHAPDEELERT, S. (2013) Capture of carbon dioxide in biogas by using *Chlorella* sp. in photobioreactor. *International Graduate Research Conference*, Chiang Mai, Thailand, (pp. 209-215).
- SMITH, A. (2022) Non-invasive optical methodologies to evaluate and enhance *Chlorella vulgaris* biomass. Doktori értekezés, University of Cambridge, Cambridge, UK, 128 pp.
- SOEDER, C.J. (1980) Massive cultivation of microalgae: results and prospects. *Hydrobiologia*, **72**, 197-209.
- SONG, C., LIU, Q., QI, Y., CHEN, G., SONG, Y., KANSHA, Y., KITAMURA, Y. (2019) Absorption-microalgae hybrid CO₂ capture and biotransformation strategy – a review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **88**, 109-117.
- SPEKTOROVA, L., CRESWELL, R.L., VAUGHAN, D. (1997) Closed tubular cultivators. *World Aquaculture*, **6**, 39-43.
- SPOLAORE, P., JOANNIS-CASSAN, C., DURAN, E., ISAMBERT, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **101**, 87-96.
- STAEHELIN, L.A. (1986) Chloroplast structure and supramolecular organization of photosynthetic membranes. In: STAEHELIN, L.A., ARNTZEN, C.J. (Szerk.): *Photosynthesis III. Encyclopedia of Plant Physiology*. Berlin: Springer, 1-84.
- STARKS, T.L., SHUBERT, L.E., TRAINOR, F.R. (1981) Ecology of soil algae: a review. *Phycologia*, **20**, 65-80.
- STATISTA (2024) Annual carbon dioxide (CO₂) emissions worldwide from 1940 to 2024. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- STEELE, W. (1993) Molecular interactions for physical adsorption. *Chemical Reviews*, **93**, 2355-2378.
- STENGER-KOVÁCS, CS. (2007) A bevonatlakó kovaalgák (*Bacillariophyceae*) alkalmazása hazai felszíni vizeink ökológiai állapotminősítésében. Doktori értekezés, Pannon Egyetem, Veszprém, 110 pp.
- STROTMANN, U., REUSCHENBACH, P., SCHWARZ, H., PAGGA, U. (2004) Development and evaluation of an online CO₂ evolution test and a multicomponent biodegradation test system. *Applied and Environmental Microbiology*, **70**, 4621-4628.
- SURESH, K., TANG, T., VAN VLIET, M.T.H., BIERKENS, M.F.P., STROKAL, M., SORGER-DOMENIGG, F., WAD, Y. (2023) Recent advancement in water quality indicators for eutrophication in global freshwater lakes. *Environmental Research Letters*, **18**, 063004.
- TABATABAEI, M., TOHIDFAR, M., JOUZANI, G.S., SAFARNEJAD, M., PAZOUKI, M. (2011) Biodiesel production from genetically engineered microalgae: Future of bioenergy in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1918-1927.
- TEKINER, M., KURT, M., AK, I., KURT, A. (2018) Determination of absorption coefficient of *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira maxima* in water. *AIP Conference Proceedings*, **1935**, 120002.
- TESTER, P.A., MATWEYOU, J., HIMELBLOOM, B., WRIGHT, B., KIBLER, S.R., LITAKER, R.W. (2020) Saxitoxin and the Cold War. *Proceedings of the 18th International Conference on Harmful Algae*, Nantes (pp. 191-194).
- THAKKAR, A., PIENKOS, P.T., NAGLE, N., DONG, T., KRUGER, J., KUMAR, S. (2024) Comparative study of flash and acid hydrolysis of microalgae (*Scenedesmus* sp.) for the recovery of biochemicals and production of porous biocarbon nanosheets. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 2253-2262.
- THERMOFISHER (2018) Quantify chlorophyll *a* and chlorophyll *b* with a custom method. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Application-Notes/quantify-chlorophyll-a-and-chlorophyll-b-with-custom-method-T141.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- THEVARAJAH, B., PIYATHILLEKE, S., SAHU, A., NIMARSHANA, P.H.V., MALIK, A., ARIYADASA, T.U. (2024) Microalgae-based bioproducts and biomaterials towards a sustainable circular bioeconomy. In: GARG, V.K., KATARIA, N. (Szerk.) *Bioeconomy for sustainability*. Singapore: Springer, pp. 125-162.
- TOKUŞOĞLU, Ö., ÜUNAL, M.K. (2003) Biomass nutrient profiles of three microalgae: *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, and *Isochrysis galbana*. *Journal of Food Science*, **68**, 1144-1148.

- TOLNER, I., NEMÉNYI, M., JANČO, R. (2024) Flow simulation in an alga photobioreactor tested under laboratory conditions. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, **74**, 35-44.
- TÓTH, V.R. (2016) Reed stands during different water level periods: physico-chemical properties of the sediment and growth of *Phragmites australis* of Lake Balaton. *Hydrobiologia*, **778**, 193-207.
- TÓTH, V.Z. (2022) Édesvízi klorofill-a meghatározási eljárások összehasonlító elemzése és fejlesztése távérzékelési módszerek alkalmazásával. Doktori értekezés, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Budapest, 113 pp.
- TÓTH, A. (2023) Magyarország tele van föld alatti szén-dioxid-tárolókkal, már csak használni kellene őket. <https://qubit.hu/2023/03/31/magyarorszag-tele-van-fold-alatti-szen-dioxid-tarolokkal-mar-csak-hasznalni-kellene-oket>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- TÖRÖK, P., T-KRASZNAI, E., B-BÉRES, V., BÁCSI, I., BORICS, G., TÓTHMÉRÉSZ, B. (2015) Magyarázza-e a funkcionális diverzitás változása a biomassza és fajgazdagság kapcsolatát leíró egycsúcsú görbe kialakulását fitoplankton közösségekben? 10. Magyar Ökológus Kongresszus, Pannon Egyetem, Veszprém. https://real.mtak.hu/27722/1/Torok_etal_10_MOK_Absztrakt.pdf. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- TROFIMCHUK, O.A., YAKOVLEV, A.N., TURANOV, S.B., TRIGUB, M.V., ROMANENKO, S.A. (2020) The influence of diverse optical wavelengths on growth rate of *Chlorella vulgaris* microalgae. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **754**, 012005.
- TUTAK, M., BRODNY, J., BINDZÁR, P. (2021) Assessing the level of energy and climate sustainability in the European Union countries in the context of the European green deal strategy and agenda 2030. *Energies*, **14**, 1767.
- UDUMAN, N., QI, Y., DANQUAH, M.K., FORDE, G.M., HOADLEY, A. (2010) Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of renewable and sustainable energy*, **2**, 012701.
- UKAPS (2025) UK Aquatic Plant Society. https://www.ukaps.org/forum/attachments/watertemp_photosynthesis-jpg.162937/. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- ULIASZ-BOCHENČZYK, A., DEJA, J. (2024) Potential application of cement kiln dust in carbon capture, utilisation, and storage technology. *Energy*, **292**, 130412.

- UMAMAHESWARI, J., RAJAMANICKAM, R., VILVANATHAN, S., SHANTHAKUMAR, S., VENKATESWARLU, K., ABINANDAN, S., MEGHARAJ, M. (2023) Removal of heavy metals and organic pollutants by marine microalgae. In: ENCARNACÃO, T., CANELAS PAIS, A. (Szerk.): *Marine organisms: A solution to environmental pollution? Environmental challenges and solutions*. Singapore: Springer, pp. 29-64.
- UNESCO (2022) UN World Water Development Report. Paris: UNESCO, 225 pp.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- UNITED NATIONS (2022) World Population Prospects. <https://population.un.org/wpp/>.
 Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- USTIN, S.L., GITELSON, A.A., JACQUEMOUD, S., SCHAEPMAN, M., ASNER, G.P., GAMON, J.A., ZARCO-TEJADA, P. (2009) Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, **113**, S67-S77.
- VALDOVINOS-GARCÍA, E.M., PETRIZ-PRIETO, M.A., OLÁN-ACOSTA, M.D.L.Á., BARAJAS-FERNÁNDEZ, J., GUZMÁN-LÓPEZ, A., BRAVO-SÁNCHEZ, M.G. (2021) Production of microalgal biomass in photobioreactors as feedstock for bioenergy and other uses: A techno-economic study of harvesting stage. *Applied Sciences*, **11**, 4386.
- VAN LAL CHHANDAMA, M., RUATPUIA, J.V.L., AO, S., CHETIA, A.C., SATYAN, K.B., ROKHUM, S.L. (2013) Microalgae as a sustainable feedstock for biodiesel and other production industries: Prospects and challenges. *Energy Nexus*, **12**, 100255.
- VASAS G. (2014) *Algavirágzások környezetterhelése és toxinjainak variabilitása*. Akadémiai nagydoktori mű, Debreceni Egyetem, Debrecen, 195 pp.
- VASAS, G., BORBELY, G., NANASI, P., NANASI, P.P. (2010) Alkaloids from cyanobacteria with diverse powerful bioactivities. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, **10**, 946-955.
- VAZQUEZ, C.F., SANCHEZ, L.J. (2022) An overview of the algae industry in Europe. Joint Research Centre, European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6af868a1-4071-11ed-92ed-01aa75ed71a1/language-en>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- VENKATARAMAN, L.V., NIGAM, B.P., RAMANATHAN, P.K. (1980). Rural oriented fresh water cultivation and production of algae in India. In: SHELEF, G., SOEDER, C.J. (Szerk.): *Algae Biomass*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/North-Holland Biomedical Press, pp. 81-96.
- VERESNÉ, E. (2010) Algák. Előadásanyag. <http://slideplayer.hu/slide/2238277/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- VUNJAK-NOVAKOVIC, G., KIM, Y., WU, X., BERZIN, I., MERCHUK, J.C. (2005) Air-lift bioreactors for algal growth on flue gas: Mathematical modeling and pilot-plant studies. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **44**, 6154-6163.
- WALLQUIST, L., VISSCHERS, V. H., SIEGRIST, M. (2010) Impact of knowledge and misconceptions on benefit and risk perception of CCS. *Environmental Science & Technology*, **44**, 6557-6562.
- WANG, B., LAN, C. Q., HORSMAN, M. (2012) Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, **30**, 904-912.
- WANG, B., LI, Y., WU, N., LAN, C.Q. (2008) CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **79**, 707-718.
- WANG, M., HU, C., BARNES, B.B., MITCHUM, G., LAPOINTE, B., MONTOYA, J.P. (2019) The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, **365**, 83-87.
- WATSON, A.J., SCHUSTER, U., SHUTLER, J.D., HOLDING, T., ASHTON, I.G., LANDSCHÜTZER, P., GODDIJN-MURPHY, L. (2020) Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory. *Nature Communications*, **11**: 4422.
- WEST, J.B. (2022) The strange history of atmospheric oxygen. *Physiological Reports*, **10**, e15214.
- WHITTAKER, R.H. (1969) New concepts of kingdoms of organisms: Evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. *Science*, **163**, 150-160.
- WOESE, C.R., KANDLER, O., WHEELIS, M.L. (1990) Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **87**, 4576-4579.
- WOLF, F.R., NONOMURA, A.M., BASSHAM, J.A. (1985) Growth and branched hydrocarbon production in a strain of *Botryococcus Braunii* (Chlorophyta). *Journal of Phycology*, **21**, 388-396.
- WOODS, J. (2008). Sustainable biofuels: prospects and challenges. London: The Royal Society. <https://royalsociety.org/-/media/policy/publications/2008/7980.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- WORLD BANK GROUP (2022) World development indicators. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.
- WORLDOMETERS (2025) Worldometers. <https://www.worldometers.info/>. Lekérdezés időpontja: 2025.03.16.

- WU, J., CHEN, L. (2024) The potential impact of climate change on the diffusion of plastic waste in the ocean. *International Journal of Marine Science*, **14**, 21-28.
- WU, N., DONG, X., LIU, Y., WANG, C., BAATTRUP-PEDERSON, A., RIIS, T. (2017) Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: review of published research and future directions. *Ecological Indicators*, **81**, 124-131.
- YANG, J., XU, M., ZHANG, X., HU, Q., SOMMERFELD, M., CHEN, Y. (2011) Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Bioresource technology*, **102**, 159-165.
- YATIRAJULA, S.K., SHRIVASTAVA, A., SAXENA, V.K., KODAVATY, J. (2019) Flow behavior analysis of *Chlorella vulgaris* microalgal biomass. *Heliyon*, **5**, e01845.
- YEH, Y.C., EBBING, T., FRICK, K., SCHMID-STAIGER, U., HAASDONK, B., TOVAR, G.E. (2023) Improving determination of pigment contents in microalgae suspension with absorption spectroscopy: Light scattering effect and Bouguer–Lambert–Beer law. *Marine Drugs*, **21**, 619.
- YOO, C., JUN, S., LEE, J., AHN, C., OH, H. (2010) Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. *Bioresource Technology*, **101**, S71-S74.
- YU, J., CHEN, L. X. (2008) The greenhouse gas emissions and fossil energy requirement of bioplastics from cradle to gate of a biomass refinery. *Environmental Science & Technology*, **42**, 6961-6966.
- ZAKKOUR, P., COOK, G. (2010) CCS Roadmap for Industry: High-purity CO₂ sources. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria, 63 pp.
- ZERVEAS, S., MENTE, M.S., TSAKIRI, D., KOTZABASIS, K. (2021) Microalgal photosynthesis induces alkalization of aquatic environment as a result of H⁺ uptake independently from CO₂ concentration - New perspectives for environmental applications. *Journal of Environmental Management*, **289**, 112546.
- ZHANG, X., RONG, J., CHEN, H., HE, C., WANG, Q. (2014) Current status and outlook in the application of microalgae in biodiesel production and environmental protection. *Frontiers in Energy Research*, **2**, 32.
- ZHOU, W., CHEN, P., MIN, M., MA, X., WANG, J., GRIFFITH, R., HUSSAIN, F., PENG, P., XIE, Q., LI, Y., SHI, J., MENG, J., RUAN, R. (2014) Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **36**, 256-269.
- ZHOU, W., WANG, J., CHEN, P., JI, C., KANG, Q., LU, B., LI, K., LIU, J., RUAN, R. (2017) Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **76**, 1163-1175.

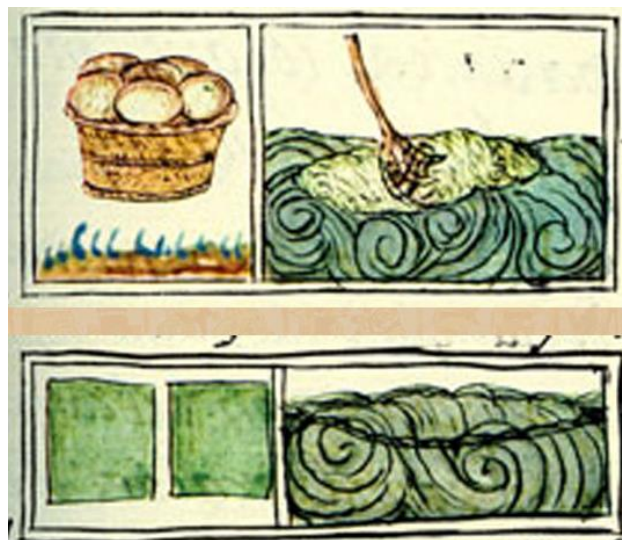
- ZIELIŃSKI, M., DEBOWSKI, M., KAZIMIEROWICZ, J., ŚWICA, I. (2023) Microalgal carbon dioxide (CO₂) capture and utilization from the European Union perspective. *Energies*, **16**, 1446.
- ZLATEVA, P., TERZIEV, A., MILEVA, N.M. (2024) Sustainable solutions for energy production from biomass materials. *Sustainability*, **16**, 7732.
- ZOHDI, E., ABBASPOUR, M. (2019) Harmful algal blooms (red tide): a review of causes, impacts and approaches to monitoring and prediction. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **16**, 1789-1806.

M2: AZ ALGA TECHNOLÓGIA KUTATÁS TÖRTÉNETE

Az első írásos említés az algafelhasználásról Kr.e. 3000-ból, az ókori Kínából származik, amiben a császári udvarban tengeri fűvek fogyasztásáról számolnak be és ahol „Tsao” néven hivatkoztak rájuk (HUISMAN 2000). Az algák történelmi jelentőségét számos kultúra irodalma és gyakorlata alátámasztja. Hawaii-szigeteken „Limu” néven ismerték és táplálékként fogyasztották, míg az ógörög irodalomban „phykos” néven említik, amelyből a római „fucus” elnevezés származik. A rómaiak ezt a moszatot főként kozmetikai célokra használták. Vergilius *Georgica* című művében az algák olcsóságát hangsúlyozza („*nihil vilior alga*”). A középkorban, a XII. század írói beszámolnak arról, hogy Franciaország északi partvidékén az algákat szántóföldi trágyázásra használták. Hasonló alkalmazást találunk Nagy-Britannia XVI. századi földművelési gyakorlatában is, ahol az algák a mezőgazdasági termelékenység növelését szolgálták (PÉTERFI 1977). Hernán Cortés és más konkvisztádorok, valamint korabeli utazók leírásai egybehangzóan alátámasztják, hogy a mai Mexikó területén elterjedt volt a mikroalga fogyasztás (M2/1 ábra). A korabeli Azték Birodalom lakosai a főváros, Tenocstitlan környékén a Texcoco-tóból gyűjtött szárított masszát fogyasztották, melyet „*tecuitlatl*”-nak neveztek (jelentése: a kő ürüléke). A kék színű, sós, sajtszerű ízvilágú étel, amely a XVI. században az azték kultúrában mindenütt jelen volt, a század végére feltételezhetően az őslakosok megfogyatkozása és a lecsapolások következtében szinte teljesen eltűnt (FARRAR 1966). A *tecuitlatl* nevű, 1520-ban felfedezett anyagot 1940-ig nem említették, mindaddig amíg a belga algakutató, Pierre Dangeard nem kezdte el tanulmányozni Csádban, a Kanembu törzs által fogyasztott *dihe*-t. Ez a szárított püré a tóban található kékalga (*Spirulina*) tavaszi formájából készül (ABDULQADER *et al.* 2000). Fodorpataki (2021) szerint a *dihe*-t kölessel fogyasztják, vagy sűrű zöldségleves készül belőle kukoricával, cirokkal és halhússal. A *Spirulina* gyűjtése június és szeptember között történik, kizárólag kora reggel, és csak nők végezhetik, mivel férfiak számára tilos a vízbe lépni. A biomasszát homokba vajt kerek gödrökben szárítják, majd lepényszerű darabokra vágják.

A vörös- (*Rhodophyta*) és barnamoszatok (*Phaeophyta*) felhasználásának nagy múltja van fikokolloid (pl. agaragar, alginát, karragén) tartalmuk miatt. A szabad szemmel is látható makroalgák biotechnológiai felhasználásának globális piaci értéke mintegy 6 milliárd USD az évente betakarított 7,5 millió tonna biomasszából. Fontos képviselőjük a *Pyropia yezoensis* (*nori*), amelyet i.sz. 530 óta a *sushi* egyik alapanyagaként használnak, így szerves része a japán konyhának. Ezt a fajt 1640 óta termesztik is Ázsiában, ami jelenleg önmagában is egy egymilliárd dolláros iparágat képvisel. Szintén Japánból származik az agar felhasználásának ötlete, amelyet főként a *Gelidium amansii* nevű vörösmoszatból választanak ki, ezért ezt a fajt az 1658-as

felfedezése óta hasznosítják és a múlt század közepe óta már mesterségesen is termesztik. Egyes barnamoszat fajokat pedig magas jód- és nátrontartalmuk miatt már 1731-től természetnek (PULZ és GROSS 2004). Ezeket az algákat elsősorban természetes élőhelyeiken, a tengerpart menti területeken termesztik és takarítják be, míg a címben szereplő mikroalgákat többnyire zárt edényzetű ún. fotobioreaktorokban állítják elő (PULZ 2001).



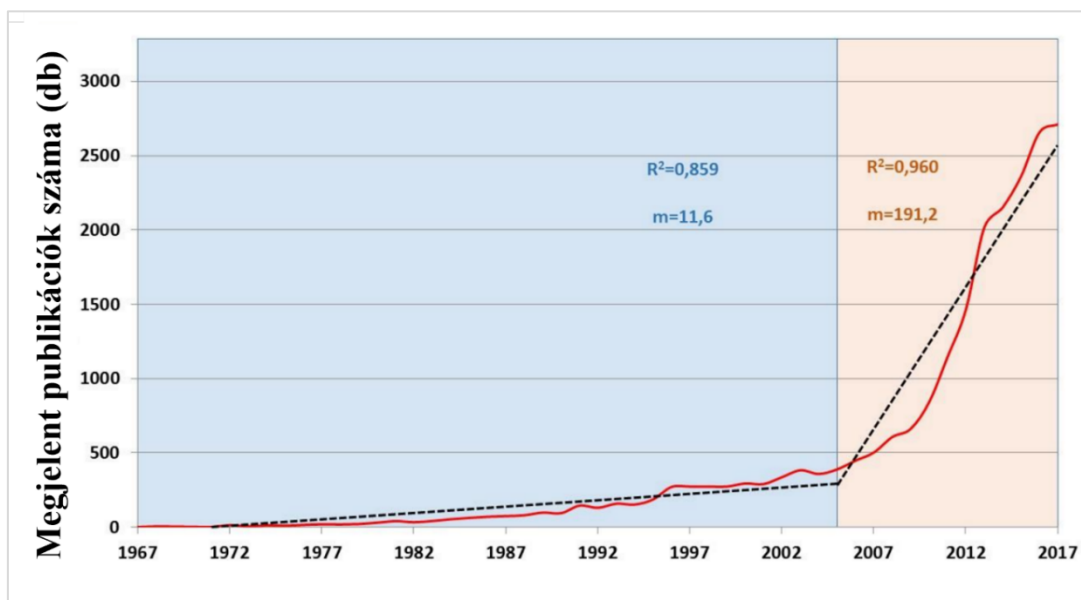
M2/1 ábra: A „*tecuitlatl*” korabeli ábrázolása a Firenzei kódexben, amelyet Bernardino de Sahagún spanyol ferences szerzetes készített Közép-Amerika lakosairól egy XVI. századi néprajzi kutatás során (GARCÍA-LÓPEZ és OLGUÍN 2020)

A mikroalga kifejezés nem egy taxonómiai elkülöníthető csoportra utal, hanem minden olyan egysejtű, fonalas, cönobiális vagy telepes alga összefoglaló neve, amelyek csak mikroszkóp alatt látszódnak. Ide sorolják a prokarióták közé tartozó cianobaktériumokat, valamint az egysejtű zöldalgákat, a vörös-, barna- és kovamoszatokat. A mikroalgák hatalmas biodiverzitással bírnak, fajszámukat 200 000 és több millió közé becslik, amelyből eddig mintegy 44 000 fajt írtak le (NORTON *et al.* 1996). Összevetve a magasabb rendű növényekkel, amelyekbe mindössze 250 000 faj tartozik, azt mondhatjuk, hogy még nagy potenciálja lehet a mikroalgák hasznosításának. A mikroalgák felhasználása időrendben jóval elmarad a makroalgáétól, bár Alfred Nobel például kovamoszatok fosszilizált vázán kötötte meg a nitroglicerint a dinamit előállításakor (PULZ és GROSS 2004). Egy új felfedezés szerint ráadásul már az Azték Birodalomban használtak *Spirulina* (cianobaktérium) fajt étkezési célra, amelyet egyes kutatók szerint termesztettek is a területen (BOURGES 1986). A mikroalgákhoz kapcsolódó iparágak évente mintegy 5000 tonna (szárazanyag-tartalomra [sz. a.] vonatkoztatott) biomasszát használnak fel, amelyből hozzávetőleg 1,25 milliárd USD forgalmat generálnak. Az ismertetett számok azonban a feldolgozási technológiák fejlődése és az óriási piaci igény miatt rohamosan nőnek (PULZ és GROSS 2004).

A mikroalgák kutatásának hatalmas lendületet adott Anton van Leeuwenhoek 1677-es találmánya, a mikroszkóp (LANE 2015). Az eszköz segítségével elkezdődött a protozoák tudományos leírása, majd a 19. századtól elindultak a technológiai hasznosításukat célzó kutatások, melyeket elsősorban a korábban megfigyelt, kiemelkedő szaporodóképességükre alapoztak (QIN *et al.* 2023). Ferdinand Cohn, a bakteriológia egyik úttörője, elsőként számolt be algák laboratóriumi „termesztéséről”. Sikeresen tartott fenn *Haematococcus* algatenyészeteket, azonban nem alkalmazott tiszta kultúrákat, sem tápközeget, ami nem eredményezett hosszú távú fenntartást. Martinus Beijerinck először izolált baktériummentes *Chlorella* és *Scenedesmus* tenyészeteket, valamint cianobaktériumokat (*Anabaena* spp.) és diatómákat. Miquel Párizsban diatómák tiszta tenyészeit hozta létre és olyan új technikákat fejlesztett, mint a mikropipettás izolálás, valamint szerves anyagokat adott a tápközegekhez. Híres „A” és „B” oldatai jelentősen hozzájárultak az algatenyészetek izolálásának és fenntartásának fejlesztéséhez. Naegeli felismerte a réz algákra gyakorolt toxikus hatását és a *Spirogyra*-fajt használta a vízminőség-tesztelésére (PREISIG és ANDERSEN 2005). A 20. század elején egyre több publikáció foglalkozott axénikus algatermesztéssel. Chodat (svájci botanikus) több, mint 30 éven keresztül gyűjtötte és fejlesztette gyűjteményét, amely több, mint 300 izolátumból állt. Ebben az időszakban számos kutató vizsgálta az algák morfológiai és növekedési válaszait a tápközegek összetételére, beleértve a szerves tápközegek alkalmazását és a pigmentáltság tápközegtől való függését. Allen és Nelson úttörő munkát végeztek a nagyléptékű algatermesztő rendszerek fénylimitációjának vizsgálatában, valamint javaslatot tettek az algák takarmányipari felhasználására. Ez az időszak az algák funkcionális és ipari alkalmazási lehetőségeinek bővülését eredményezte (NAGY 2023).

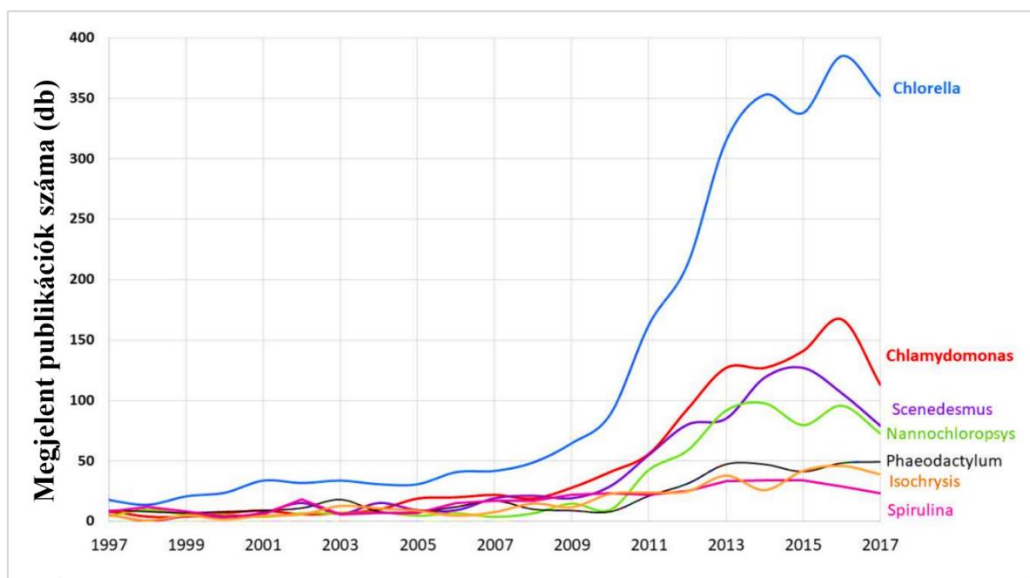
A modern algakutatás és biomassza előállítás a 30-as években, Németországban kezdődött el, majd a háború után az Egyesült Államokban, később Japánban és Izraelben folyt a legintenzívebben (BURLEW 1953). Ennek eredményeképp Japánban és Taiwanon már a '60-as évek óta sikeresen zajlik a nagyüzemi *Chlorella*-termesztés egészséges élelmiszerek előállítása céljából (KAWAGUCHI 1980). Az algák alkalmazása a szennyvíztisztítás folyamatában az '50-es években lett népszerű (OSWALD és GOTAAS 1957). Az ezt következő évtizedben pedig az űrkutatás vette górcső alá az algák lehetséges felhasználását, mint lehetséges táplálék és oxigénforrás (ECKART 2013). 1974-re Mexikóban az *Arthrospira* szabadtéri termesztése elérte az 1000 kg/nap mennyiséget (PIRIE 1975). Szintén a '70-es években kezdődtek azok a nagyon intenzív kutatások, amelyek az alga energetikai hasznosítását tűzték ki célul (SOEDER 1980) és még ma is igen népszerűek. A '60-as évek óta az algabiomassza egyik legsikeresebb felhasználója a finomvegyipar (CARDOZO *et al.* 2007). Az 1980-as években az USA-ban és Ausztráliában a *Dunaliella* nagyléptékű termesztését β -karotin előállítására használták (QIN *et al.* 2023). A 20.

század végére a nagyléptékű termesztési folyamatok fejlődésének köszönhetően több mikroalgafaj kereskedelmi termelésben vagy pilot fázisban volt, továbbá a mikroalgák termesztése globálisan elterjedtté vált. Az M2/2 ábrán látható az a robbanásszerű növekedés, amely a mikroalgákkal kapcsolatos publikációk megjelenésének számában megfigyelhető a 21. század kezdetétől.



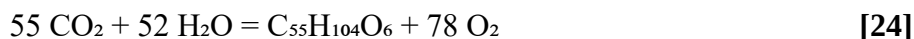
M2/2 ábra: A mikroalgákkal kapcsolatos publikációk számának alakulása 1970 és 2017 között (GARRIDO-CARDENAS *et al.* 2018)

A *Chlorella vulgaris* mikroalga fajt igen gyakran választják a kutatók a kísérleteikhez (M2/3 ábra). A *C. vulgaris* CO₂ felvételének kutatása hosszú múltra tekint vissza, amely téma disszertációm fő tárgyát is képezi. Az áttörést a Nobel-díjas Otto Warburg (1883–1970) érte el, aki a levelek és teljes növények vizsgálatáról erre az egysejtű zöldalgára helyezte a hangsúlyt (KROGMANN 2004). A *Chlorella* a mai napig modellorganizmusként szolgál a fotoszintézis tanulmányozásában (NICKELSEN 2007, 2009). Andrew Benson és munkatársa, a Nobel-díjas Melvin Calvin (1912–1997), a ¹⁴CO₂ izotópot nyomjelzőként használva felfedezték, hogy a foszfoglicerinaldehid (egy triozfoszfát) a CO₂-redukció első stabil terméke. Azonosították a ribulóz-biszfoszfátot, egy 5 szénatomos cukrot, mint a CO₂ akzeptort, és feltárták azt a ciklust, amely ezt az akzeptort újra előállítja (CALVIN *et al.* 1950, CALVIN 1956).



M2/3 ábra: A legtöbbet vizsgált mikroalga nemzetségek publikációs számainak időbeli alakulása (GARRIDO-CARDENAS *et al.* 2018)

Barker (1935) munkájában megjegyzi, hogy Beijerinck 1904-es kijelentése nyomán, miszerint az algák szénhidrátok helyett zsírokat termelnek és tárolnak, heves vita alakult ki a fotoszintézist leíró egyenletről. Míg az általánosan ismert egyenlet elfogadásáig eljutottak, egyes kutatók az ellenkező véleményt képviselték, miszerint a zsírok a fotoszintézis legfontosabb végtermékei:



Azóta, Krogmann (2004) szerint, konszenzus alakult ki a kutatók között, miszerint a lipidek további átalakulások eredményeként keletkeznek és az oxigéntermelő fotoszintézis képlete [25] a következő:

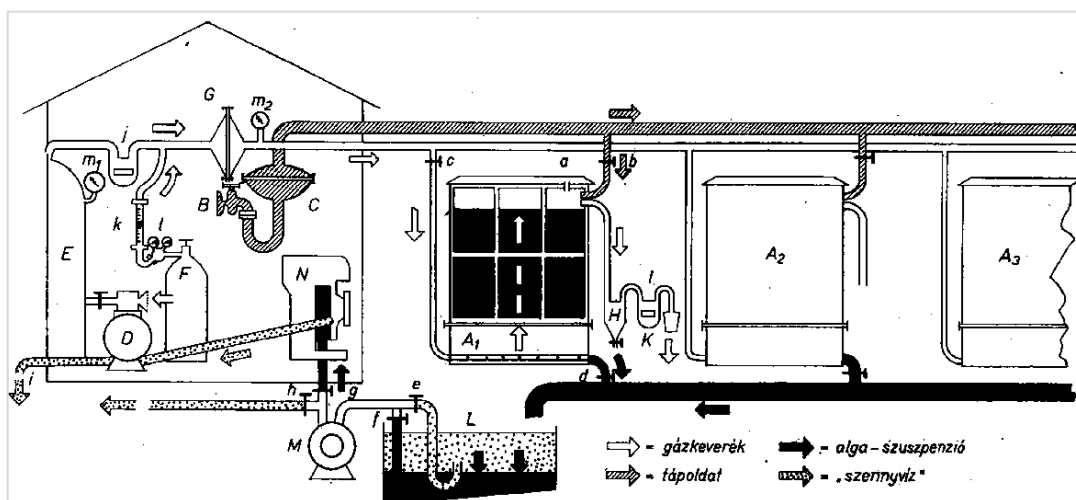


M3: ALGAKUTATÁS MAGYARORSZÁGON

A hazai algakutatásokról megállapítható, hogy egy-egy kezdeményezést leszámítva alapvetően elszigetelten zajlik. Az egyetemi kutatásokról elmondható, hogy az intézmények egy nem kifejezetten algákra szakosodott tanszékén egy, ritkább esetben több kutató foglalkozik a témával, akik egymástól teljesen függetlenül és jellemzően más és más aspektusból vizsgálják az algákat. Juhász és szerzőtársai (2018) szerint a hazai kutatások másik fő jellemzője, hogy a nemzetközi irányokhoz hasonlóan széleskörűek, azonban elsősorban az algák biológiai és ökológiai jellemzőivel foglalkozó alapkutatások jellemzőek, míg a gazdasági élet szereplőivel együttműködő alkalmazott kutatások kevésbé hangsúlyosak. Ezen tényeket tudomásul véve különösen fontosnak találom, hogy a disszertációmban a nemzetközi kutatások mellett megemlítsre kerüljön az általam megismert hazai algakutatók munkássága is. Így ez a rövid összefoglaló akár támpontot nyújthat egy, az algakutatások jövőbeli összehangolását célzó kezdeményezés elindításához is.

A hazai algológia első úttörőjének Endlicher István Lászlót (a tudományban ismertebb nevén: Stephan Ladislaus Endlicher) lehet tekinteni, aki polihisztorként több tudományterület magasfokú művelője volt. A Bécsi Botanikus kert igazgatójaként foglalkozott az algákkal és azokat a telepes növények (*Thallophyta*) közé sorolta. Bár a korszerű rendszerezések az algákat törzsfelföldéstani (filogenetikai) alapon már különböző törzsekbe sorolják, ez a felosztás felhívta a figyelmet az algák közös talofita jellegére (PÉTERFI 1977). Péterfi István már korai kutatásaival és szakdolgozatával is hozzájárult a román algológia megalapozásához és fejlesztéséhez Ioan Grințescu algológus irányításával. Későbbi kutatásaiban vizsgálta a növényi hormonok algatenyészetekre gyakorolt hatását, az egysejtű zöldalgák tiszta tenyészeinek táplálkozás-élettani felhasználásának hatásait, valamint a zöldalga bioproduktivitását különböző ipari szennyvizekben. Kutatásai nagy hatással voltak a mikroszkopikus algák irányított termesztésén alapuló biotechnológiákra és a környezet minőségének mikroalgákkal történő bioindikációjára (FODORPATAKI és SZIGYÁRTÓ 2006). Felföldy Lajos a 20. századi magyar botanika és hidrobiológia kiemelkedő jelentőségű alakja. Az 50-es évektől a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Tihanyi Biológiai Kutatóintézetében dolgozott, ahol több növényélettani témát (pl. vízforgalom, szárazságtűrés, fotoszintézis, növényi produkció, cellulózbontás, növényi kataláz aktivitás) vizsgált, majd a munkatársaival többek között kidolgozta egyes egysejtű algafajok tömeges és axénikus termesztésének technológiáját (M3/1 ábra). Életre hívta és szerkesztette a Vízügyi Hidrobiológia sorozatot, melyben megírta a hazai cianobaktériumok, a zöldalgák *Desmidiaceae*-rendje és a zöldalgák *Phycomonadina*-csoportja, valamint a hínárnövények határozóit

(MOLNÁR *et al.* 2017). 1987-es munkájában egy hazánkban széles körben alkalmazott klorofill-a-tartalom meghatározási módszer kifejlesztését publikálta (GRÓSZ 2021).



M3/1 ábra: A MTA Ökológiai Kutatóközpont Balatoni Limnológiai Intézetében Felföldy által létrehozott kétköbméteres algatermesztő berendezés (FELFÖLDY 1964)

A továbbiakban kísérletet teszek – természetesen a teljesség igénye nélkül – a még aktív kollégák munkásságát is röviden összefoglalni. Az összefoglalás alapját Paulik Krisztina (2012) *Innotéka* magazinban megjelent interjú-cikke adja, kiegészítve Juhász és munkatársainak 2018-as cikkével az algakutatás hazai helyzetéről. A folyó kutatásokat és a kiemelt személyeket a kutatóhelyük szerint csoportosítottam:

MTA / Magyar Kutatási Hálózat (HUN-REN)

Balatoni Limnológiai Kutatóintézet:

A kutatások középpontjában a fitoplankton fajok dinamikája és ökofiziológiája áll (TÓTH 2016). *Vörös Lajos*: a fényviszonyok hatása pikoalgák szaporodására; új *Chloroparva pannonica*-fajt azonosítottak (PAULIK 2012); *Présing Mátyás*: nitrogénforgalom és tápelemek hatása algákra, cianobaktériumokra (PAULIK 2012). *Futó Péter*: fonalas zöldalga tenyésztési körülményeinek optimalizálása biotechnológiai alkalmazások céljából (HUN-REN BLKI 2022)

Szegedi Biológiai Kutatóközpont:

Garab Győző: fotoszintetikus membránok működésének vizsgálata (PAULIK 2012).

Ökológiai Kutatóközpont:

Kiss Keve Tihamér, Ács Éva: folyóvizek algológiája, kovaalgák ökoszisztémaszerepe (PAULIK 2012); *Borics Gábor*: felszíni vizek fitoplankton alapú ökológiai állapotértékelése (BORICS 2016); *B-Béres Viktória*: extrém klimatikus események hatása bevonatalkotó algaközösségekre (HUN-REN ÖK 2025a); *T-Krasznai Enikő*: algaközösségek biodiverzitásának dinamikája (HUN-REN ÖK 2025b); *Abonyi András*: lebegő életmódú algák (fitoplankton) biodiverzitás–működés

kapcsolat elemzése, nagy folyók hosszú távú, ökoszisztéma léptékű változásainak kutatása (HUN-REN ÖK 2025c).

Budapesti Műszaki Egyetem

Németh Áron: mikrobiális és enzimes rendszerek kinetikája, ipari mikrobiológia, bioreaktorok működése (BME 2025); *Nagy Balázs József, Gyalai-Korpos Miklós*: algaalapú mezőgazdasági ágensek fejlesztése, fotobioreaktorok működése, algaalapú szennyvíztisztítás kutatása (NAGY 2023); *Kiss Bernadett*: mikroalga tenyésztési és detektálási módszerek (KISS 2024).

Debreceni Egyetem

Alga toxintermelés és másodlagos anyagcsere-termékek kutatása (VASAS *et al.* 2010); *Borbély György*: cianobakteriális toxinok élő szervezetekre gyakorolt hatása (PAULIK 2012); *Vasas Gábor*: az algák gyógyszeripari, farmakognóziai és kozmetikai felhasználásának lehetőségeit is vizsgálja (VASAS 2014); *Bácsi István*: klórozott szénhidrogén szennyezők fitoplankton közösségekre gyakorolt hatása, algapopulációk közötti interakciók, algatársulások diverzitása (DEBRECENI EGYETEM 2021); *Bai Attila*: az algaalapú bioüzemanyagok megvalósíthatóságát és az alga tenyésztés költséghatékony megoldási lehetőségeit kutatja hígtrágyákon (BAI *et al.* 2011, 2012); *Török Péter*: fitoplankton és kovaalga-közösségek funkcionális diverzitása (TÖRÖK *et al.* 2015); *Kókai Zsuzsanna*: a környezeti szélsőségek, a természetvédelmi oltalom és a területhasznosítás szerepe a kovaalga jellegek közösség szintű változásában (KÓKAI 2021).

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Preininger Éva: a mesterséges nitrogént kötő asszociációk működése zöldalga, nitrogén-kötő baktérium és növény hármas kapcsolatán (PAULIK 2012); *Márialigeti Károly*: molekuláris taxonómiai módszerek alkalmazása (PAULIK 2012).

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

A *Székács András* vezette Agrár-környezettudományi Kutatóközpontban *Klátyik Szandra*: növényvédőszer toxikológiai hatásainak vizsgálata algákon (KLÁTYIK 2021); *Roszkos Róbert*: algaalapú N-3 zsírsavak hatásainak vizsgálata sertések takarmányozására (ROSZKOS 2023); *Tóth Veronika Zsófia, Grósz János*: algaalapú vízminőség monitoring terepi és távérzékelési eszközökkel (TÓTH 2022, GRÓSZ 2021); *Bíró Borbála*: Az alga és bioplazma termékek mezőgazdasági használatának lehetőségei (BÍRÓ 2017).

Pannon Egyetem

Padisák Judit: algapopulációk és fajok kompetíciós viszonyainak vizsgálata (PAULIK 2012); *Bocsi Róbert*: mikroalgák termesztése *flat panel* foto-bioreaktorokban (BOCSI 2016); *Hodai Zoltán*: algabiomassza előállítási lehetőségei fotobioreaktorokban (HODAI 2015); *Stenger-Kovács Csilla*: a bevonatlakó kovaalgák (*Bacillariophyceae*) alkalmazása hazai felszíni vizeink ökológiai állapotminősítésében (STENGER-KOVÁCS 2007).

Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem

Fodorpataki László (korábban a Babeş-Bolyai Tudományegyetem munkatársaként): alga-biotechnológiák, zöld mikroalgák téplálkozásának élettana és metabolikus markereiknek felhasználása a vízi környezet minősítésében és a biológiai víztisztításban (SAPIENTIA 2021).

Széchenyi István Egyetem

Mosonmagyaróváron *Ördög Vince* vezetésével az algák növényi hormontermelését és gyakorlati hasznosíthatóságát kutatják, valamint létrehozták a *Mosonmagyaróvár Algal Culture Collection*-t, ami az egyik legnagyobb európai algagyűjtemény (ÖRDÖG *et al.* 2016); *Jáger Katalin*: növényi növekedésszabályozó anyagokat termelő alga törzsek, mint alternatív hormonforrások felhasználása magasabb rendű növények szövettenyésztéseiben (JÄGER 2005); *Neményi Miklos, Tolner Imre Tibor*: kinematikai szimulációk hurok kialakítású fotobioreaktoron (TOLNER *et al.* 2024).

Szegedi Tudományegyetem

Kovács Kornél: algabiomassza biogáz fermentációs lehetőségeinek vizsgálata (NKFI-EPR 2016); *Maróti Gergely, Lakatos Gergely*: hidrogén fermentációs lehetőségek vizsgálata cianobaktériumok révén (LAKATOS 2015).

Az algológia területén folyó kutatásokat korábban az 1990-ben alapított Magyar Algológiai Társaság fogta össze. Itt lehetett megosztani az egyes kutatóhelyeken felhalmozott tudást, valamint lehetőséget biztosított a személyes kapcsolattartásra is az Algológiai Találkozó és Továbbképzés (ATT) megszervezése és lebonyolítása révén. A szervezet 2011-es megszűnésével járó űrt próbálta enyhíteni a 2012-ben létrejött Algológus Fórum, amely évről évre megszervezi a Találkozókat. Az ATT-k szakmai programja lehetőséget nyújt arra, hogy tudományos eredményeinket megismertessük azokkal a gyakorlati szakemberekkel, akik a jövőben majd hasznosítani tudják a bemutatott eredményeket. Emellett a gyakorlati munkát végző kollégák megoszthatják

tapasztalataikat és eredményeiket, ezáltal támogatva az elméleti tudományos munkát. Továbbá a program keretein belül a fiatal kollégák, valamint egyetemi és főiskolai hallgatók is bemutathatják saját munkáikat. A Találkozó fő szervezői: B-Béres Viktória, T-Krasznai Enikő, Abonyi András, Stenger-Kovács Csilla, Bácsi István és Török Péter (HUN-REN ÖK 2023).

M4: AZ ALGABIOMASSZA LEHETSÉGES FELHASZNÁLÁSI MÓDJAI IPARÁGAK SZERINT

Élelmiszeripar

A prokarióta algák igen gazdagok fehérjékben (M4/1 táblázat), továbbá az aminosav eloszlásuk a kéntartalmú aminosavak (cisztein és metionin) kivételével kedvezően kiegyensúlyozott (M4/2 táblázat). Ugyanez igaz az esszenciális zsírsavtartamára (SANTILLAN 1982), így a *Spirulina*-fajokat a szójababnál is kedvezőbb fehérje-forrásként tartják számon (CIFERRI 1983). Az eukarióta algafajokat illetően, a *Scenedesmus*-, a *Chlorella*- és a *Coelastrum*-fajok élelmiszeripari felhasználása a legjelentősebb, továbbá hozzávetőleg azonos beltartalommal bírnak (M4/2 táblázat) (DE LA NOUE és DE PAUW 1988). A mikroalgák igen gazdagok vitaminokban és egyéb, növekedést segítő anyagokban, így több fejlődő országban (pl. Peru, Thaiföld, India) is megjelentek ipari méretű algatermesztő egységek, de hasonló beruházásokkal lehet találkozni Izraelben és az Egyesült Államokban is (BECKER *et al.* 1976). A mikroalgák fogyasztása egyéb pozitív hatásokkal is járhat, mint az ásványi anyagok utánpótlása és a probiotikus hatások. Az algasejtek elfogyasztása ugyanis támogatja az emésztőrendszert az egészséges bélbaktérium-flóra fenntartásával, valamint a valószínűsített immunmoduláns hatásával (BELAY *et al.* 1993). Az algasejtek emészthetőségét nagyban befolyásolják az alkalmazott technológiai eljárások a feldolgozásuk során. A sejtfalak felhasításával ugyanis jelentősen nőhet az emészthetőség, amit szárítódob alkalmazásával, vagy permetes szárítással érhetünk el (VENKATARAMAN *et al.* 1980).

M4/1 táblázat: A *Scenedesmus obliquus* és *Spirulina maxima* mikroalgafajok beltartamának összehasonlítása a szójagmag, illetve egy búzaszem beltartalmi értékeivel (SOEDER 1980)

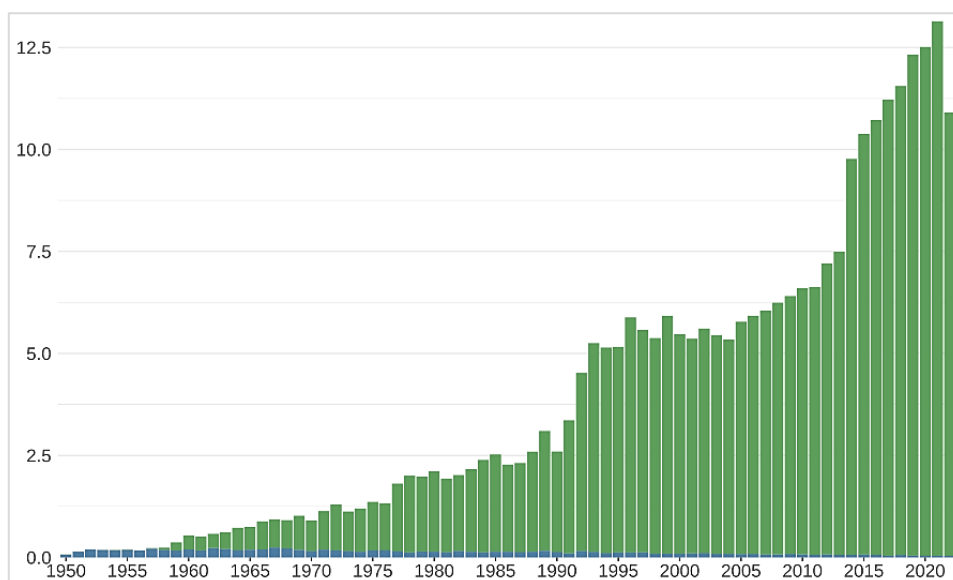
Komponens (%)	<i>Scenedesmus obliquus</i>	<i>Spirulina maxima</i>	Szója mag	Búzaszem
nyers fehérje	50–60	56–62	34–40	13,4–13,5
víz	4–8	10	7–10	12,8–13,5
lipidek	12–14	2–3	16–20	2,1–2,4
szénhidrátok	10–17	16–18	19–35	78,6–80,5
nyers rost	3–10	0,1–0,9	3–5	2,1–2,4
hamutartalom	6–10	6,4–9,0	4–5	1,6–2,8

M4/2 táblázat: Két *Scenedesmus*-faj esszenciális aminosav-összetételének összehasonlítása az Egészségügyi Világszervezet Mezőgazdasági Szervezete által ajánlott értékekkel (g/16 gN) (DE LA NOUE és DE PAUW 1988, FAO 1973)

Aminosav	<i>Scenedesmus acutus</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	FAO
valin	4,7	5,7	5,0
leucin	7,0	8,3	7,0
izoleucin	3,1	4,1	4,0
fenilalanin és tirozin	6,6	10,1	6,0
lizin	4,6	5,9	5,5
metionin és cisztein	3,2	2,9	3,5
triptofán	1,7	n.a.	1,0
treonin	4,9	8,6	4,0

A másik oldalon megjelentek olyan projektek, amelyek az algák lehetséges toxicitását kutatják állatokon és embereken is. Egyes esetekben enyhe érzékenységet figyeltek meg a vizsgálatba vont alanyokon (SHUBERT *et al.* 1985), de egyéb komoly tüneteket nem tudtak kimutatni, így az algák továbbra is biztonságos táplálékforrásként vannak számontartva (PABST 1978, CIFERRI 1983). Mindezek ellenére a mikroalgák direkt fogyasztása nem megoldható annak jelentős előállítási költségei, valamint a fogyasztásának kedvezőtlen társadalmi elfogadottsága (gyenge ízélmény, kulturális idegenség) miatt. Egészséges élelmiszerként és táplálékkiegészítőként azonban már jelenleg is igen elterjedtek, továbbá a termékek drágábban is értékesíthetőek (RICHMOND 1986). Jelenleg a táplálékkiegészítőként értékesített algakészítmények 75%-ban por, tableta, kapszula vagy pasztilla formájában érhető el. A piacon azonban számtalan próbálkozást figyelhetünk meg a vonzóbb megjelenésű, de még mindig igen jótékony hatású algakészítmények esetében. Ilyen a tésztákba, müzliszeletekbe, süteményekbe vagy joghurtba történő bekeverés, vagy az üdítőitalok készítése különböző mikroalgából. Az utóbbiak, az ún. funkcionális élelmiszerek alkotják az élelmiszeripar legdinamikusabban fejlődő szegmensét, melyek egyes becslések szerint a közeljövőben a teljes szektor mintegy 20%-át tehetik majd ki (PULZ és GROSS 2004).

Fodorpataki (2021) szerint a globális algatermesztés 60%-át a *Saccharina japonica* (elnevezése 2006 előtt *Laminaria japonica*) vagy más néven *konbu* termesztése teszi ki, ami elsősorban annak köszönhető, hogy ebben az algában fedezték fel elsőként az ötödik alapízt, az *umami*-t, amely azóta is meghatározó ízfokozója nem csak az ázsiai, de minden más, ételízesítőt alkalmazó nemzet konyhájának is (MILINOVIC *et al.* 2021). A 2020-as évekre ennek az algának az előállítása elérte az évi 10 millió tonna értéket (M4/1 ábra).



M4/1 ábra: A *Saccharina japonica* begyűjtése (kék) és akvakultúrában történő termesztése (zöld) millió tonnában kifejezve 1950 és 2022 között (FAO 2009)

Az E-számok az EU-ban engedélyezett élelmiszer-adalékanyagok kódjai, amelyek között számos olyan anyag szerepel, amelynek előállítása az algatermesztésen alapszik. Ezek lehetnek ételszínezékek, antioxidánsok, savanyúságot szabályozó anyagok, sűrítőanyagok, stabilizátorok és emulgeálószer, valamint csomósodást gátló anyagok és ízfokozók (M4/3 táblázat).

M4/3 táblázat: Néhány algaalapú zselésítőszer E-száma és azok felhasználási területei (SEAWEED 2025)

Termék megnevezése	E-szám	Kinyerés	Felhasználás	Tipikus termékek
alginát és származékai (pl. nátrium-alginát, propilén-glikol-alginát)	E400–405	nagy barnamoszatok, (pl. <i>Laminaria hyperborea</i> , <i>Ascophyllum nodosum</i> és <i>Macrocystis</i> -fajokból)	emulgeáló-, szuszpendáló-, stabilizáló-, zselésítő-, sűrítőszer	fagylaltok, turmixok, instant desszertek, pudingok, szuszpendáló szerek üdítőitalokban, kencék alapjai
agar	E406	Főleg <i>Gelidium</i> -, <i>Pterocladia</i> - és <i>Gracilaria</i> -fajokból	emulgeálószer, stabilizátor, zselésítő- és sűrítőszer	fagylaltok, konzervek, mázok, húspácok
karragén	E407	<i>Eucheuma</i> -, <i>Betaphycus</i> -, és <i>Kappaphycus</i> -fajok, <i>Chondrus crispus</i>	emulgeálószer, stabilizátor, zselésítő- és sűrítőszer	fagylaltok, turmixok, instant desszertek, pudingok, szuszpendáló szerek üdítőitalokban, kencék alapjai

Állattakarmányozás

Az állatok megfelelő táplálása mindig is nagy jelentőséggel bírt, de napjainkban különösen fontossá vált annak érdekében, hogy az egyre népszerűbb vegyszermentes (pl. hozzáadott antibiotikumok) diétákra áttérhessünk (PULZ és GROSS 2004). Ahogy az emberi fogyasztásra,

úgy állatok takarmányozására is kiválóan alkalmazható az algabiomassza. Állatkísérletekben patkányokon, egereken, baromfin, sertésen, juhon és pontyon is egyértelműen kimutatták, hogy a *Chlorella*-, *Scenedesmus*- és *Spirulina*-fajok kiváló fehérjeforrások és mentesek mindennemű szennyezőanyagtól (BECKER 1986). Bár ezt megállapították a hosszú távon szennyvizen termesztett algák esetében is, ezek takarmányként való alkalmazása továbbra is tilos, annak ellenére, hogy nem mutattak ki bennük nehézfémeket a megengedett határértékek szintje felett (DE PAUW *et al.* 1984). 50%-os algabiomassza arány alkalmazását követően kedvező eredményeket igazoltak takarmányozási kísérletekben (RICHMOND 2004). Később azt is kimutatták, hogy jóval kisebb dózisok alkalmazásával is jó eredményeket lehet elérni, annak köszönhetően, hogy a mikroalga-adalékok kedvező élettani hatást gyakorolnak az állatokra, ami elsősorban az immunrendszer-erősítő hatásuknak köszönhető (BELAY *et al.* 1993). A felismerés a mikroalgák egyre növekvő takarmány-adalékanyagként történő felhasználását eredményezte elsősorban a baromfi szektorban. Az algaalapú-adalékok másik legfontosabb felhasználói a kedvtelésből tartott háziállat-tenyészetek lettek, ugyanis az egészségjavító hatások mellett kedvező hatásokat figyeltek meg az állatok külső megjelenésére (pl. fényesebb bunda, szebb tollak) nézve is a kúrát követően (KRETSCHMER *et al.* 1995).

Akvakultúra

Az algáknak hatalmas jelentősége van az akvakultúrákban, az éves szinten világszerte értékesített 39,4 millió tonna akvakultúra-termékeknek mintegy 22%-át a tengerifüvek teszik ki (PREISIG és ANDERSEN 2005). A mikroalgák akvakultúrákban történő alkalmazása nagy múltra tekint vissza, ugyanis az 1940-es évek óta használják őket halak, kagylók és rákfélék takarmányozására (SOEDER 1980). Az algák termesztése azonban jelentős többletköltséget jelent, ezért elsősorban a legérzékenyebb célcsoport, az ivadékok esetében alkalmazzák az algaalapú táplálék-kiegészítőket (SPEKTOROVA *et al.* 1997). Világszerte több, mint 40 mikroalga-faj használata terjedt el az üzemi méretű akvakultúrákban (M4/4 táblázat), amely fajokat gyakran (pl. *Chlorella*-, *Spirulina*-fajok) csak kis mennyiségben, táplálékkiegészítőként adagolják a haltápokhoz (LAVENS és SORGELOOS 1996).

Taxon megnevezése	Nemzettség
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Skeletonema, Chaetoceros, Phaeodactylum, Nitzschia, Thalassiosira</i>
<i>Prymnesiophyta</i>	<i>Isochrysis, Pavlova</i>
<i>Prasinophyceae</i>	<i>Tetraselmis</i>
<i>Chlorophyceae</i>	<i>Chlorella, Scenedesmus, Dunaliella</i>
<i>Cyanobacteria</i>	<i>Spirulina</i>

A takarmányozáson kívül igen jelentős az algák színanyagainak felhasználása a díszhal tenyészeteknél, ahol gyakori a fikocianint tartalmazó *Spirulina*-, vagy a *Dunaliella*-fajok alkalmazása, annak karotinoid tartalma miatt. Ráadásul ezen fajok alkalmazása immunerősítő hatással bír, amelyet ponty tenyészetekben igazoltak (SCHRECKENBACH *et al.* 2001). Az algaszínanyagok alkalmazásának további gazdasági jelentősége van a lazacfélék húsának piros színét adó astaxantin haltáphoz adagolása révén, amelyet a *Haematococcus pluvialis* fajtából nyernek ki (PICCARDI *et al.* 1999).

Talajjavítás, növényvédelem

A makroalgákat vagy azok maradékát már a történelem kezdete óta alkalmazták a tengerparti régiókban, aminek oka az volt, hogy megfigyelések szerint javítják a talaj ásványi anyag összetételét és vízmegkötő képességét (CRITCHLEY és OHNO 1998). Ez a tevékenység tovább bővült a makroalgákból kivont vizes oldatok alkalmazásával, amit erózió elleni védekezésre, valamint rekultivációs tevékenységek során használnak fel a növényélet beindításához. A talajjavításra és a növényvédelmi alkalmazásokra fókuszáló iparág hozzávetőleg 5 milliárd USD forgalmat bonyolít évente (PULZ és GROSS 2004).

A mikroalgák jelentőségét a talajéletben gyakran elhanyagolják. Pedig számos jótékony hatásukról van már tudomásunk, mint pl. a részecske-megkötő polimerek előállítás, a vízháztartás javítása vagy a nitrogén megkötése (*Anabaena*-, *Nostoc*-fajok) (METTING 1996). Curtin (1985) számításai szerint 1 kg nitrogénköti cianobaktérium kijuttatásával közel 60 kg hagyományos műtrágyát lehetne kiváltani. Ráadásul a mikroalgák egyes bioaktív komponensei közvetlen módon segítik a magasabb rendű növények életét. A mikroalgák felhasználásának ezen a területen nagy jövője van, ugyanis ezeknek a csírázást, virágzást és növekedést elősegítő hatású komponenseknek a kivonatával a környezetre ártalmatlan új típusú növényvédőszerket nyerhetünk (ÖRDÖG *et al.* 1996).

Bio-műanyagok

Az algából készített bioműanyagoknak a hulladékgazdálkodásban és az orvostudományban van kiemelkedő szerepük. Környezetvédelmi szempontból hatalmas előnyük a hagyományos kőolajszármazékokkal szemben, hogy ezek nem a föld alól kibányászott szénforrásokból készülnek, hanem a helyszínen, az alga által megkötött szervesanyagból kerülnek előállításra. Ha az algából készített bioműanyagok a hulladékkezelés során energetikai hasznosításra kerülnek, akkor egy közel egyensúlyban levő szénmérleget kaphatunk (YU és CHEN 2008). Továbbá előnyös lehet, ha eleve olyan anyagokat szintetizálnak belőlük, amelyek le tudnak bomlani. Ilyen lehet például a *poli(3-hidroxi-butirát)* (PHB), amely egy 100%-ban lebomló, hőre táguló alifás poliészter, amit baktériumok (pl. *Bacillus megaterium*) állítanak elő és ballasztanyagként tárolnak a szervezetükben. Egyes kutatások szerint a *Phaeodactylum tricornutum* nevű kovamoszat is képes szintetizálni, amivel lehetőség adódik a PHB nagyüzemi előállítására fotobioreaktorokban (HEMPEL *et al.* 2011). A PHB-ból készült habokat az orvoslásban is alkalmazzák, ugyanis különféle támaszokat, implantátumokat és protéziseket készítenek belőlük, amelyeket műtéti úton építenek be az emberi szervezetbe, majd a saját szövetek helyreállítódása után egy újabb operációval eltávolítják őket (PÁL 2006).

Finomvegyipar

A biotechnológia lehetővé teszi a megtermelt mikroalga-biomasszából kinyert anyagok (pl. cukrok, poliszacharidok, gyógyszerek, festékek, bioflokkulensek, pigmentek, vitaminok, lipidek, olajok) további hasznosítását. Ezeknek az anyagoknak a szintézise azonban még körülményesebb, hiszen fajlagosan sokkal kisebb mennyiséget tudnak előállítani egy speciális komponensből, mint a teljes biomasszából. Ennek ellenére igen sok közülük már hasznosításba került és valószínűleg még több olyan kiaknázatlan anyag van, amelynek még nem ismerjük a hatását, így a felvevő piaca sem alakulhatott ki. Alapvetően két csoportja van az itt felhasznált anyagoknak: az első a sejten belüli hatóanyagoké, amelyek vagy részt vesznek a sejt ozmózis szabályozásában (pl. glicerín, szorbit, mannit), vagy nem (pl. keményítő, amiláz, amilopektin, glikogén). A másik csoport a sejten kívüli termékeké, amelyek elsősorban poliszacharidok (pl. glükán, mannán), szénhidrogének vagy poliakrilátok. Nyilvánvaló, hogy az utóbbit lehet hasznosítani könnyebben, ráadásul általában anélkül, hogy megsértenénk a sejteket (DE LA NOUE és DE PAUW 1988). A különböző hasznosítási módokat a jelenlegi kereskedelmi értékükkel együtt a M4/4 táblázat foglalja össze. A leggyakrabban alkalmazott algaalapú-finomvegyipari termékek a következők:

Többszörösen telítetlen zsírsavak

Az algák nagy arányban tartalmaznak többszörösen telítetlen zsírsavakat, amelyek a halakban található hasonló zsírsavakkal ellentétben nem társulnak kellemetlen szaganyagokkal, könnyebben tisztíthatók és eleve kisebb a kémiai szennyezettségük. A fototróf tengeri élőlényekből (pl. a *Cryptothecodinium cohnii* dinoflagelláta), eikozapentaénsav és dokozahexaénsav nyerhető, amelyek az egészséges- és bébiétel piacon egyaránt népszerűek és gyorsan terjednek (PULZ és GROSS 2004). Jelenleg az étkezési célú olajok előállítására a *Chlorella*-fajok mutatkoznak a legkedvezőbbnek, míg az ipari olajok (ide tartozik az alga biodízel is) extrakciójához a *Botryococcus braunii* fajt érdemes alkalmazni az el nem szappanosítható lipidjei miatt (WOLF *et al.* 1985).

Poliszacharidok

A makroalgákból előállított poliszacharidok, mint az agar, az alginit és a karragén az algatermékek egyik legfontosabb részét képezik. A mikroalgák közül pl. a *Scenedesmus*-fajokban találhatunk karragént. Az exo-poliszacharidok elsődleges felvevője az élelmiszeripar, ugyanis az exo-poliszacharidokat sűrítő- és zselésítőanyagként, stabilizátorként és sok más különböző célra használják fel (DE LA NOUE és DE PAUW 1988). A kénezett poliszacharidoknak emellett az immunerősítő hatását is kimutatták. A kénezett poliszacharidok elsősorban a cianobaktériumokban fordulnak elő, de egyes zöld- és sárgamoszat-fajokban is megtalálhatók (NAMIKOSHI 1996).

Antioxidánsok

A mikroalgáknak volt idejük adaptálódni az extrém élőhelyekhez. A fototróf életmódjuknak köszönhetően folyamatosan nagy sugárzásnak és magas oxigéntartalomnak voltak kitéve, így számos hatékony módszert fejlesztettek ki ezen extrém környezeti hatások kivédésére. Ezek a mechanizmusok lehetővé teszik számukra, hogy elkerüljék a sejteket károsító szabad gyökök (pl. szuperoxid-anion, hidroxil-gyök) felhalmozódását. Ilyen módszer például a rendkívül hatékony antioxidáns gyökfogó komplexek termelése, amely anyagokat a kozmetikai ipar használja fel a bőr védelmére szolgáló krémek előállítására. Ha mellé vesszük a szintén algából előállított napsugárzás elleni védő krémeket (beleértve a leégés utáni krémeket is), akkor itt is egy gazdaságilag jelentős területet figyelhetünk meg. Az algák által biztosított gyökfogó képességet belsőleg alkalmazva is kihasználják, ezáltal egyre nő a kereslet az alga-antioxidánsból készült gyógyhatású készítmények iránt, amelyek gyulladáscsökkentő hatással rendelkeznek (PULZ és GROSS 2004).

Színanyagok és ételszínezékek

Az kovaalgák fotoszintéziséért felelős xantofilt a baromfitenyésztésben használják fel az izomszövetek és a tojássárgájának élénkebb színének érdekében. A cianobaktériumok (kékalgák) által használt fikocianinból ételszínezéket és kozmetikumok festékanyagait állítják elő, de találkozni lehet vele egyéb festékek kapcsán is (pl. a kék farmernadrágok gyártásánál) (DE LA NOUE és DE PAUW 1988). A fotosztintetizáló pigmenteken kívül az algákban vannak egyéb pigmentek is, amelyek közvetett úton segítik a fény hasznosítását. Ilyenek a karotinoidok, amik megvédik a sejtet a túlzott sugárzástól, továbbá a fikobili-proteinek, amelyek a fotonok jobb hasznosításában segítik a sejteket. Az ipari hasznosításuk során többek között a *Dunaliella*-fajok β -karotin tartalmát az A-vitamin prekursoraként, míg a *Haematococcus*-fajok astaxantinját a halhús színezésére használják fel a lazac tenyészetekben (HIRATA *et al.* 2000).

Vitaminok

A *Spirulina*-fajok kimagaslóan magas vitamintartalma már régóta közismert. Elsősorban B12-vitaminban gazdag fajok, de megtalálható bennük a fitol is, amely több vitamin (pl. A-, E-, K-, K2-vitaminok) prekuzora (BELAY *et al.* 1993).

Toxinok és egyéb biológiailag aktív anyagok

A toxinok igen szemléletes példaként szolgálnak arra vonatkozóan, hogy az algák milyen erős bioaktív vegyületeket képesek előállítani. Ezt leginkább algavirágzáskor lehet megfigyelni, amikor az egyes algafajok (pl. *Dinoflagellata*- és *Cyanobacteria*-fajok) által termelt toxinok egész tengeröblök élővilágát képesek megmérgezni. Bár az algából szintetizált toxint (szaxitoxin) már a hidegháborúban is használták a kémek halálkapszulájaként (POWERS 2015), a legtöbb toxin részletes élettani hatása még ismeretlen.

Vírusellenes hatóanyagokat elsősorban cianobaktériumokban találhatunk, de a színtelen kovaalgákban és egyes *Spirogyra*-fajokban is előfordulnak olyan szulfolipidek, amelyek aktív védelmet nyújtanak például a *herpes simplex* vírus ellen. Gombaellenes aktivitás figyelhető meg a cianobaktériumok különböző kivonataiban, míg a *Spirogyra*- és *Oedogonium*-fajok esetében féreghajtó hatóanyagokat különítettek el (PULZ és GROSS 2004). A *Chlorella*- és *Scenedesmus*-fajok kivonataiból *in vitro* antibakteriális aktivitást mutattak ki, amik ezzel egyidejűleg serkentik az élesztők és más mikroorganizmusok növekedést. Ez a tulajdonság tette kívánatosá az alkalmazásukat a fermentációs iparban, a tejsavbaktériumok növekedésének támogatásával (DE LA NOUE és DE PAUW 1988).

Stabil izotópok

Mivel a fototróf mikroalgákat szigorúan ellenőrzött körülmények között lehet termesztani, ezek a csoportok ideálisak lehetnének stabil izotópok szerves szén-, hidrogén- és nitrogénforrásból való beépítésére. A különböző stabil izotóppal jelzett kemikáliákat nem csak a tudományos munkákhoz lehetne használni (pl. molekuláris szerkezet tanulmányozás vagy élettani vizsgálatok), de gyógyászati célokra is alkalmazhatóak lehetnének (pl. emésztőrendszeri vagy a légúti diagnosztikai vizsgálatok) (RADMER 1996).

M4/5 táblázat: A mikroalgából készült termékek piacának becsült mérete (PULZ *et al.* 2008)

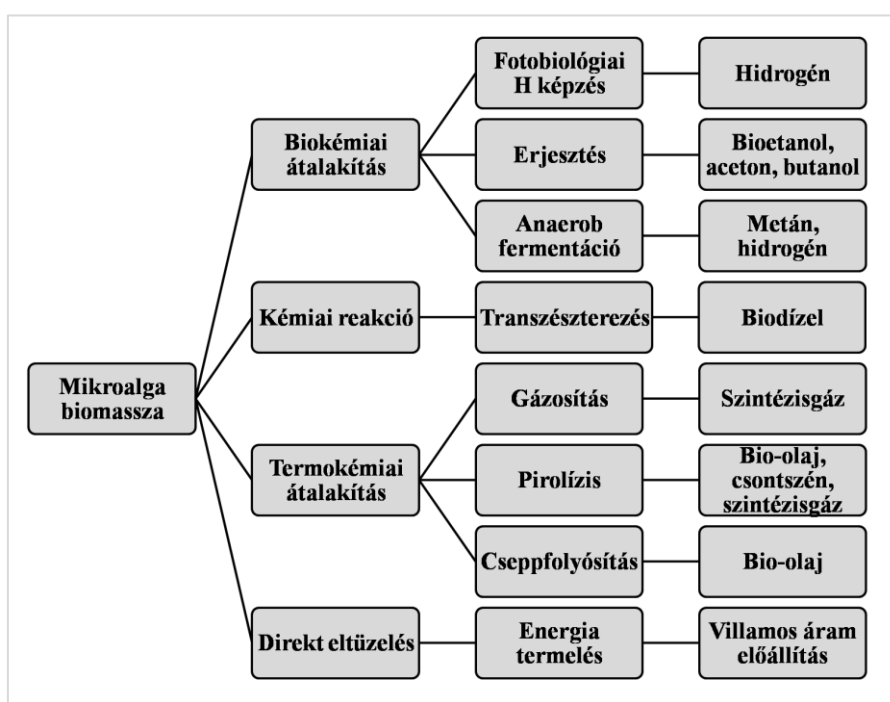
Termék csoport	Termék	Kereskedelmi érték (millió USD)	Fejlődés
biomassza	egészséges étel	1250–2500	növekvő
	funkcionális étel	800	növekvő
	táplálék kiegészítő	300	gyorsan növekvő
	akvakultúra	700	gyorsan növekvő
	talajjavító	-	ígéretes
színanyagok	astaxantin	<150	új felhasználás
	fikocianin	>10	stagnál
	fikoeritrin	>2	stagnál
antioxidánsok	β -karotin	>280	ígéretes
	ARA	20	növekvő
	DHA	1500	gyorsan növekvő
	többszörösen telítetlen zsírsav kivonat	10	-
speciális termékek	toxinok	1–3	-
	izotópok	>5	-

Energetikai hasznosítás

A mikroalgák energetikai hasznosításának gondolata már a '70-es évek óta foglalkoztatja a kutatókat. Az algatermesztésnek a bevezetésben részletezett előnyös tulajdonságai miatt az algaalapú üzemanyagokat külön csoportba, az ún. harmadik generációs bioüzemanyagok közé szokás sorolni (DRAGONE *et al.* 2010). Természetesen az így előállított biomassza, mint a legtöbb lebontható szervesanyag alkalmas arra, hogy erjesztés útján energiadús anyagokat (pl. metán, alkohol, vagy egyéb folyékony üzemanyagok) nyerjenek ki belőle (COHEN 1986). Szintén alkalmazhatóak a hulladékgazdálkodásból már ismert termikus eljárások, mint a gázosítás vagy a pirolízis (BABICH *et al.* 2011). A lehetséges átalakítási útvonalakat a M4/2 ábra mutatja be.

Külön említést érdemel a biodízel előállítása, amely a járművek hajtóanyagaként szinte kizárólagosan használt kőolajszármazékokat hivatott kiváltani a fenntarthatóság jegyében. Az

algabiodízel kutatása során gyakran alkalmazott faj a *Botryococcus braunii*, melynek lipidtartalma elérheti a 85%-ot is száraz tömegre vonatkoztatva és amiben igen magas az ebből a szempontból kívánatosnak tekinthető hosszúláncú zsírsavak aránya (SHIFRIN 1984). A mikroalgákból nyert olaj a hagyományos olajnövényeknél magasabb arányban tartalmaz többszörösen telítetlen zsírsavakat (négy vagy több kettős kötéssel), ami miatt a tárolás során haljamossá válik az oxidációra. A többszörösen telítetlen zsírsavak aránya azonban a margaringyártásból ismert részleges katalitikus hidrogénezéssel lecsökkenthető (CHISTI 2007). Az energetikai iparág az eddig tárgyalt hasznosítási ágazatoknál jóval nagyobb mennyiségű, lehetőleg száraz biomasszát igényel, ami tulajdonképpen a legnagyobb akadálya is annak, hogy az algából kinyerhető üzemanyagok széles körben elterjedhessenek (BENEMANN *et al.* 1986).



M4/2 ábra: A mikroalga-biomassza bioüzemanyagokká történő átalakításának lehetőségei (DRAGONE *et al.* 2010)

M5: A SZŰRÉSEL MEGHATÁROZOTT ALGABIOMASSZA EREDMÉNYEK

M5/1 táblázat: A szűréssel meghatározott algabiomassza-koncentrációk

hígítás (x)	m _{szp} (mg)	m _{szp+a} (mg)	szűrlet mennyisége (mL)	m _a (mg)	alga konc. (mg/L)	átlag (mg/L)
1x	6,6317	6,6434	15	11,7	780	770±26
	6,6799	6,6878	10	7,9	790	
	6,6462	6,6536	10	7,4	740	
2x	6,7663	6,7775	25	11,2	448	420±33
	7,1991	7,2098	25	10,7	428	
	6,9279	6,9375	25	9,6	384	
5x	7,0865	7,0934	40	6,9	172	178±5
	7,1596	7,1669	40	7,3	182	
	7,1087	7,1158	40	7,1	178	
10x	6,9712	6,9751	50	3,9	78	79±2
	7,0582	7,0621	50	3,9	78	
	6,8524	6,8565	50	4,1	82	
20x	7,0266	7,0287	70	2,1	30	31±1
	6,9545	6,9568	70	2,3	33	
	6,8632	6,8654	70	2,2	31	
50x	8,8053	8,8066	100	1,3	13	15±6
	7,6063	7,6073	100	1,0	10	
	7,8059	7,8081	100	2,2	22	
100x	6,674	6,6754	150	1,4	9	9±0
	6,6841	6,6855	150	1,4	9	
	6,7989	6,8003	150	1,4	9	
200x	6,259	6,2594	200	0,4	2	2±0
	7,3578	7,3583	200	0,5	2	
	7,7693	7,7699	200	0,6	3	
500x	7,3081	7,3085	240	0,4	2	1±0
	6,7562	6,7564	240	0,2	1	
	6,9823	6,9827	240	0,4	2	
1000x	7,0727	7,0724	200	-0,3	-2	-4±2
	8,0379	8,0373	150	-0,6	-4	
	7,668	7,6671	150	-0,9	-6	

M6: A BEPÁRLÁSI MARADÉK ALAPJÁN MEGHATÁROZOTT ALGABIOMASSZA EREDMÉNYEK

M6/1 táblázat: Az algaszuszpenziók bepárlási maradék alapján meghatározott eredményei

Hígítás	ism.	m _{tégely} (g)	m _{tégely+alga szuszpenzió} (g)	M _{tégely+száraz alga+só} (g)	M _{száraz alga+só} (g)	M _{száraz alga+só} (mg)	Alga koncentrá- ció (mg/L)
1x	1	48,0844	86,7205	48,3269	0,2425	242,5	6062
	2	46,7598	85,4778	47,0040	0,2442	244,2	6105
	3	46,8851	85,5035	47,1276	0,2425	242,5	6062
2x	1	44,1003	83,1545	44,2232	0,1229	122,9	3073
	2	44,4845	83,1393	44,6076	0,1231	123,1	3078
	3	50,1250	88,5085	50,2442	0,1192	119,2	2980
5x	1	53,3762	89,5642	53,4227	0,0465	46,5	1163
	2	50,6894	90,0542	50,7385	0,0491	49,1	1228
	3	52,2454	90,0965	52,2930	0,0476	47,6	1190
10x	1	45,2558	81,7073	45,2776	0,0218	21,8	545
	2	52,4023	90,9020	52,4201	0,0178	17,8	445
	3	52,9169	85,5353	52,9357	0,0188	18,8	470
20x	1	52,0950	91,7163	52,1061	0,0111	11,1	277
	2	43,8820	81,5471	43,8941	0,0121	12,1	303
	3	46,5836	84,1907	46,5935	0,0099	9,9	248
50x	1	45,7126	84,1597	45,7167	0,0041	4,1	103
	2	56,2671	94,6117	56,2712	0,0041	4,1	103
	3	49,9052	87,0898	49,9091	0,0039	3,9	98
100x	1	55,4619	90,8358	55,4663	0,0044	4,4	110
	2	43,5511	82,2141	43,5536	0,0025	2,5	63
	3	56,6934	90,6766	56,6949	0,0015	1,5	38
200x	1	56,9546	95,3945	56,9548	0,0002	0,2	5
	2	51,2620	89,3305	51,2624	0,0004	0,4	10
	3	46,8690	85,2478	46,8701	0,0011	1,1	28
500x	1	45,7107	84,7361	45,7125	0,0018	1,8	45
	2	46,8302	84,9717	46,8314	0,0012	1,2	30
	3	54,8238	93,2569	54,8264	0,0026	2,6	65
1000x	1	46,5774	85,1957	46,5780	0,0006	0,6	15
	2	49,3189	88,2074	49,3201	0,0012	1,2	30
	3	56,7455	95,1737	56,7463	0,0008	0,8	20

M6/2 táblázat: A kicentrifugált sóoldatok szuszpenziók bepárlási maradék eredményei

Hígít- tás	ism.	M _{tégely} (g)	M _{tégely+alga szuszpenzió} (g)	M _{tégely+száras alga+só} (g)	M _{száras alga+só} (g)	M _{száras alga+só} (mg)	Alga koncentrá- ció (mg/L)
1x	1	13,2340	23,2507	13,2873	0,0533	53,3	5330
	2	16,9179	26,7824	16,9696	0,0517	51,7	5170
	3	15,6381	25,6901	15,6866	0,0485	48,5	4850
2x	1	16,3259	26,4073	16,3528	0,0269	26,9	2690
	2	15,5011	25,5364	15,5256	0,0245	24,5	2450
	3	16,1667	26,2238	16,1935	0,0268	26,8	2680
5x	1	16,5776	26,6489	16,5885	0,0109	10,9	1090
	2	16,9150	27,0070	16,9242	0,0092	9,2	920
	3	16,6630	26,6857	16,6742	0,0112	11,2	1120
10x	1	20,3198	30,4139	20,3242	0,0044	4,4	440
	2	16,0010	26,0680	16,0049	0,0039	3,9	390
	3	16,0188	26,0849	16,0231	0,0043	4,3	430
20x	1	17,4435	27,4574	17,4459	0,0024	2,4	240
	2	20,7743	30,8180	20,7766	0,0023	2,3	230
	3	20,4279	30,4689	20,4304	0,0025	2,5	250
50x	1	17,6021	27,6409	17,6023	0,0002	0,2	20
	2	16,2747	26,3278	16,2760	0,0013	1,3	130
	3	17,5463	27,5968	17,5474	0,0011	1,1	110
100x	1	14,8643	24,9421	14,8650	0,0007	0,7	70
	2	20,0728	30,1419	20,0732	0,0004	0,4	40
	3	20,0331	30,0759	20,0338	0,0007	0,7	70
200x	1	16,9382	27,0085	16,9374	-0,0008	-0,8	-80
	2	36,1887	46,2650	36,1877	-0,0010	-1	-100
	3	16,1581	26,1737	16,1570	-0,0011	-1,1	-110
500x	1	15,8572	25,8687	15,8573	0,0001	0,1	10
	2	16,0738	26,0947	16,0740	0,0002	0,2	20
	3	16,2685	26,3430	16,2688	0,0003	0,3	30
1000x	1	19,6248	29,6281	19,6318	0,0070	7	700
	2	16,8239	26,8204	16,8146	-0,0093	-9,3	-930
	3	16,3742	27,4057	16,3745	0,0003	0,3	30

M7: A MAGNÉZIUM KONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁS EREDMÉNYEI

M7/1 táblázat: A hamu kivonatokban meghatározott magnézium-koncentrációk

Hígítás (x)	Mg-koncentráció az össz. bepárlási maradék hamujából mérve (µg/40 ml)			Mg-koncentráció a szűrlet bepárlási maradékának hamujából mérve (µg/40 ml)		
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	minta ₁	minta ₂	minta ₃
1	18,40	18,98	19,52	11,77	9,73	10,85
2	11,19	12,41	11,87	7,58	7,49	7,24
5	6,32	7,44	6,95	5,44	5,68	6,27
10	5,20	5,34	5,05	5,05	4,91	4,37
20	4,32	4,56	4,17	3,15	3,10	3,40
50	3,83	3,69	3,93	3,15	3,35	3,30
100	3,59	2,81	3,69	3,01	2,37	2,86
200	3,10	3,30	3,01	2,47	2,47	2,37
500	2,76	2,71	2,62	2,13	2,37	2,28
1000	2,32	2,42	2,28	2,03	2,03	2,13

M7/2 táblázat: A mérések különbsége alapján meghatározott magnézium-koncentrációk

Hígítás (x)	Mg (µg/40mL)			Mg (µg/L)				Szórás (-)
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	
1	6,62	9,25	8,67	165,58	231,33	216,72	204,5	34,5
2	3,60	4,92	4,63	90,10	122,97	115,66	109,6	17,3
5	0,88	1,75	0,68	21,92	43,83	17,05	27,6	14,3
10	0,15	0,44	0,68	3,65	10,96	17,05	10,6	6,7
20	1,17	1,46	0,78	29,22	36,53	19,48	28,4	8,6
50	0,68	0,34	0,63	17,05	8,52	15,83	13,8	4,6
100	0,58	0,44	0,83	14,61	10,96	20,70	15,4	4,9
200	0,63	0,83	0,63	15,83	20,70	15,83	17,5	2,8
500	0,63	0,34	0,34	15,83	8,52	8,52	11,0	4,2
1000	0,29	0,39	0,15	7,31	9,74	3,65	6,9	3,1

M8: A PH-ÉRTÉKEK ALAKULÁSA A MIKROALGA SZÉNFELVÉTELÉT VIZSGÁLÓ MODELLKÍSÉRLETBEN

M8/1 táblázat: A pH-értékek alakulása a mikroalga szénfelvételét vizsgáló modellkísérletben

idő (óra)	0	12	24	36	48	60	72	84	96	
kontroll kezelés (hamu kivonat és CO ₂ diffúzió nélkül), pH érték (-)										
1. ism.	6,94	6,94	6,97	7,01	6,99	7,01	6,99	6,99	6,99	7,00
2. ism.	6,94	6,94	6,98	7,01	6,98	7,00	6,96	6,99	6,98	6,98
3. ism.	6,95	6,95	6,99	7,02	7,00	7,02	6,99	7,00	6,98	6,99
Átlag	6,94	6,94	6,98	7,01	6,99	7,01	6,98	6,99	6,98	6,99
szórás	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
0% WBA kezelés (hamu kivonat nélkül, CO ₂ diffúzióval), pH érték (-)										
1. ism.	6,79	6,02	6,43	6,50	6,87	6,87	6,87	6,90	6,88	6,90
2. ism.	6,80	5,99	6,41	6,57	6,86	6,90	6,87	6,89	6,87	6,90
3. ism.	6,79	6,04	6,40	6,52	6,80	6,88	6,85	6,86	6,86	6,87
Átlag	6,79	6,02	6,41	6,53	6,84	6,88	6,86	6,88	6,87	6,89
szórás	0,01	0,03	0,02	0,04	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
10% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO ₂ diffúzió), pH érték (-)										
1. ism.	9,89	6,01	6,59	6,77	7,33	8,06	9,03	9,61	9,98	10,15
2. ism.	9,50	6,00	6,59	6,78	7,20	7,69	8,23	8,55	9,44	9,82
3. ism.	9,63	5,97	6,60	6,77	7,24	7,89	8,65	9,28	9,68	9,87
Átlag	9,67	5,99	6,59	6,77	7,26	7,88	8,64	9,15	9,70	9,95
szórás	0,20	0,02	0,01	0,01	0,07	0,19	0,40	0,54	0,27	0,18
25% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO ₂ diffúzió), pH érték (-)										
1. ism.	11,13	6,02	6,64	6,85	7,12	7,52	7,88	8,24	8,73	9,10
2. ism.	11,18	6,00	6,57	6,77	6,96	7,36	7,68	8,02	8,56	8,94
3. ism.	11,24	6,00	6,55	6,79	7,04	7,40	7,86	8,00	8,50	8,92
Átlag	11,18	6,01	6,59	6,80	7,04	7,43	7,81	8,09	8,60	8,99
szórás	0,06	0,01	0,05	0,04	0,08	0,08	0,11	0,13	0,12	0,10
50% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO ₂ diffúzió), pH érték (-)										
1. ism.	12,12	6,02	6,61	6,83	7,00	7,17	7,32	7,47	7,69	7,84
2. ism.	12,14	6,01	6,63	6,84	7,00	7,15	7,34	7,47	7,64	7,78
3. ism.	12,20	6,00	6,60	6,80	6,97	7,11	7,30	7,46	7,67	7,89
Átlag	12,15	6,01	6,61	6,82	6,99	7,14	7,32	7,47	7,67	7,84
szórás	0,04	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,06

M9: AZ ALGABIOMASSZA KONCENTRÁCIÓK ALAKULÁSA A MIKROALGA SZÉNFEKVÉTELÉT VIZSGÁLÓ MODELLKÍSÉRLÉTBEN

M9/1 táblázat: Az optikai sűrűség és az algabiomassza koncentráció alakulása a mikroalga szénfelvételt vizsgáló modellkísérletben

Idő (óra)	Optikai sűrűség (-)			Biomassza koncentráció (mg/L sz.a.)			Átlag (mg/L sz.a.)	Szórás (-)
	1. ism.	2. ism.	3. ism.	1. ism.	2. ism.	3. ism.	(mg/L sz.a.)	(-)
kontroll kezelés (hamu kivonat és CO₂ diffúzió nélkül)								
0	0,045	0,040	0,038	6,2	5,5	5,2	5,626	0,498
12	0,050	0,043	0,043	6,9	5,9	5,9	6,224	0,559
24	0,073	0,068	0,072	10,1	9,4	9,9	9,787	0,369
36	0,102	0,095	0,103	14,1	13,1	14,3	13,847	0,613
48	0,100	0,094	0,107	13,8	13,0	14,8	13,894	0,915
60	0,107	0,105	0,114	14,8	14,5	15,8	15,067	0,667
72	0,112	0,116	0,112	15,5	16,1	15,5	15,725	0,326
84	0,110	0,126	0,115	15,3	17,5	16,0	16,244	1,158
96	0,119	0,135	0,115	16,5	18,8	16,0	17,094	1,500
0% WBA kezelés (hamu kivonat nélkül, CO₂ diffúzióval)								
0	0,045	0,036	0,039	6,2	4,9	5,3	5,488	0,633
12	0,051	0,045	0,049	7,0	6,2	6,7	6,639	0,423
24	0,135	0,132	0,129	18,8	18,4	17,9	18,369	0,426
36	0,276	0,278	0,274	39,3	39,6	39,0	39,305	0,298
48	0,299	0,315	0,353	42,7	45,1	50,9	46,268	4,200
60	0,305	0,318	0,362	43,6	45,6	52,3	47,178	4,535
72	0,301	0,309	0,338	43,0	44,2	48,6	45,305	2,941
84	0,316	0,314	0,360	45,3	45,0	52,0	47,427	3,950
96	0,331	0,333	0,373	47,6	47,9	54,0	49,805	3,618
10% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO₂ diffúzió)								
0	0,043	0,040	0,037	5,9	5,5	5,1	5,487	0,414
12	0,063	0,058	0,052	8,7	8,0	7,1	7,933	0,764
24	0,193	0,183	0,167	27,1	25,7	23,4	25,386	1,891
36	0,450	0,432	0,373	66,0	63,1	54,0	61,035	6,273
48	0,654	0,670	0,642	99,4	102,2	97,4	99,652	2,393
60	0,751	0,873	0,783	116,2	138,3	121,9	125,501	11,471
72	0,827	1,024	0,723	129,9	167,3	111,3	136,156	28,501
84	0,936	1,096	0,922	150,2	181,8	147,5	159,821	19,047
96	0,948	1,087	0,926	152,5	179,9	148,3	160,226	17,188

25% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO ₂ diffúzió)								
0	0,051	0,045	0,046	7,0	6,2	6,3	6,501	0,445
12	0,064	0,064	0,063	8,8	8,8	8,7	8,766	0,080
24	0,179	0,165	0,145	25,1	23,1	20,2	22,799	2,450
36	0,369	0,344	0,312	53,4	49,5	44,7	49,201	4,345
48	0,609	0,585	0,511	91,8	87,8	75,7	85,125	8,386
60	0,851	0,885	0,803	134,3	140,6	125,5	133,452	7,554
72	1,041	1,035	1,010	170,7	169,5	164,5	168,207	3,256
84	0,989	1,124	1,080	160,4	187,5	178,5	175,475	13,814
96	1,080	1,087	1,036	178,5	179,9	169,7	176,028	5,563
50% WBA kezelés (10% hamu kivonat és CO ₂ diffúzió)								
0	0,055	0,057	0,052	7,6	7,8	7,1	7,516	0,349
12	0,068	0,068	0,067	9,4	9,4	9,2	9,322	0,080
24	0,114	0,111	0,104	15,8	15,4	14,4	15,208	0,724
36	0,177	0,158	0,132	24,8	22,1	18,4	21,751	3,231
48	0,270	0,271	0,228	38,4	38,6	32,2	36,397	3,621
60	0,443	0,435	0,402	64,9	63,6	58,5	62,318	3,399
72	0,590	0,596	0,658	88,7	89,7	100,1	92,806	6,338
84	0,708	0,710	0,850	108,7	109,1	134,1	117,281	14,552
96	0,792	0,785	0,956	123,5	122,3	154,0	133,281	17,963

M10: AZ OLDOTT SZERVETLEN SZÉNKONCENTRÁCIÓ MÉRÉS EREDMÉNYEI

M10/1 táblázat: Az *OxiTop* készülékkel mért nyomásértékek az algaövekedési modellkísérlet előtt

Kezelés	A mért nyomásértékek a modellkísérlet előtt (hPa)				
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	szórás
kontroll	0	0	0	0,0	0,00
0% WBA	2	2	2	2,0	0,00
10% WBA	11	8	9	9,3	1,52
25% WBA	29	32	29	30,0	1,73
50% WBA	58	61	59	59,3	1,52

M10/2 táblázat: Az *OxiTop* készülékkel mért nyomásértékek az algaövekedési modellkísérlet után

Kezelés	A mért nyomásértékek a modellkísérlet után (hPa)				
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	szórás
kontroll	1	0	1	0,7	0,57
0% WBA	1	0	1	0,7	0,57
10% WBA	1	1	0	0,7	0,57
25% WBA	17	18	17	17,3	0,57
50% WBA	44	40	42	42,0	2,00

M10/3 táblázat: Az oldott szerves széntartalom alakulása az algaövekedési modellkísérlet előtt

Kezelés	A számolt DIC-tartalom a modellkísérlet előtt (mg C /L)				
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	szórás
kontroll	0,00	0,00	0,00	0,0	0,000
0% WBA	10,42	10,42	10,42	10,4	0,000
10% WBA	57,32	41,69	46,90	48,6	7,960
25% WBA	151,11	166,74	151,11	156,3	9,025
50% WBA	302,22	317,85	307,43	309,2	7,960

M10/4 táblázat: Az oldott szerves széntartalom alakulása az algaövekedési modellkísérlet után

Kezelés	A számolt DIC-tartalom a modellkísérlet után (mg C /L)				
	minta ₁	minta ₂	minta ₃	átlag	szórás
kontroll	5,21	0,00	5,21	3,5	3,008
0% WBA	5,21	0,00	5,21	3,5	3,008
10% WBA	5,21	5,21	0,00	3,5	3,008
25% WBA	88,58	93,79	88,58	90,3	3,008
50% WBA	229,27	208,43	218,85	218,9	10,421

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt szeretném megköszönni témavezetőimnek, dr. Aleksza Lászlónak és dr. Czinkota Imrének, a munkám során nyújtott szakmai irányítást, a rengeteg ötletet, tanácsot és az elakadások során nyújtott segítséget, amelyek nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre.

Köszönöm Csákiné dr. Michéli Erika intézetigazgató asszonynak, hogy lehetővé tette a mesterszakos képzésem során elkezdett mikroalga tanulmányaim folytatását a Környezettudományi Doktori Iskola PhD programja keretében.

Köszönöm a Cranfield University kollégáinak, dr. Phil Longhurtnak és dr. Ying Jiangnak, hogy a diplomadolgozatom témaválasztása által elindítottak az algakutatás útján.

Disszertációm kerek egy évtizedes kutatómunka eredménye. A munka során a felhasznált algát egy *Chlorella vulgaris* labor törzsből folyamatosan fenntartottam, amelyben köszönöm dr. Pavel Škaloudnak, a prágai Károly Egyetem CAUP algagyűjteményének kurátorának és dr. Mayer Zoltánnak a segítségét.

A hosszú munkában köszönöm a Környezettudományi Intézet kollégáinak a támogatást, kiváltképpen a Talajtani Tanszék Agrokémiai Csoportjának: dr. Tolner Lászlónak, dr. Gulyás Miklósnak és dr. Dálnoki Anna Boglárkának a modellkísérleteim összeállításában és lebonyolításában; dr. Takács Anitának, dr. Rétháti Gabriellának, Berze Veronikának és Prókainé Nemes Ágnesnek a laboratóriumi mérések kivitelezésében nyújtott segítséget. Kiemelt köszönettel tartozom az eredményeim publikálása során nyújtott segítségért dr. Székács András Professzornak, dr. Klátyik Szendrának és dr. Sebők Andrásnak.

Köszönöm a Profikomp Környezettechnika Zrt. munkatársainak a támogatást, ahol betekintést nyerhettem az üzleti élet, valamint a kutatási projektek világába és lehetőséget kaptam a gyakorlatban is felhasználható, üzemi méretű fotobioreaktor tervezésére és megépítésére.

Köszönöm a Doktori és Habilitációs Központ munkatársainak, elsősorban Hajdú Móka központvezetőnek; valamint Dr. Gulyás Miklósnak a Környezettudományi Doktori Iskola tudományos titkárának a képzés során felmerülő kérdésekkel kapcsolatban nyújtott, fáradhatatlan segítségnyújtást.

Köszönöm családomnak a támogatást, hogy biztonságos háttérrel biztosítottak a tanulmányaim során.

Köszönöm Feleségemnek, Nagy Lindának, hogy a hosszú munka során türelmével és lelkesítésével kitartást adott a disszertáció megírásához.

Vizsgálataim az alábbi kutatási pályázatokhoz kapcsolódtak:

- 2018-1.1.2-KFI-2018-00131 Mikroalga tenyésztő rendszerek technológiai fejlesztése, egyedi geometriájú 3D nyomtatott egységek alkalmazásával
- KEHOP-3.2.1-15-2021-00037 A körforgásos gazdaságra történő átállás előkészítési feladatai a mezőgazdasági és zöldhulladékok esetében
- TKP2021-NVA-22 Az agrár- és élelmiszergazdaság létfontosságú rendszerelemei és kritikus infrastruktúrái megerősítésének kutatása - különös tekintettel a vízbázis védelem, a különleges élelmiszertermékek, az adatalapú működés, a monitoringrendszer fejlesztésére és a honvédelmi kritikus infrastruktúrák működtetésének körforgásos gazdasági szemléletű fejlesztésére