



Mikroalgaszaporítás optimalizációja szimulációs metodikával

- TDK dolgozat -

Készítette:

Nagy Alexandra Dóra
Környezetmérnök BSc

Belső konzulens

Szilágyi Ferenc PhD, Egyetemi docens
BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Külső konzulens

Tózsér Béla, Ügyvezető
Envihorizont Kft.

Budapest 2012



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem. Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig általam a dolgozat feltöltésekor beállított jogosultságokkal (publikus vagy titkos) egyezve közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. A TDK konferenciára való regisztrációval vállalom, hogy az általam publikált anyagot határidőre elkészítem, a konferencián személyesen megjelenek és eredményeimet előadom. A benyújtott tudományos munkát magam készítettem (vagy szerzőtársammal, szerzőtársaimmal együtt készítettük), minden, a szakirodalomból átvett bármely rész elérhetőségét – a forrás pontos, más által is elérhető formátumban – zárójelben megjelölt hivatkozásként megadom.

Köszönetnyilvánítás

A "Mikroalgaszaporítás optimalizációja szimulációs metodikával" című TDK dolgozat elkészítése során sokan voltak segítségemre és sok tapasztalattal gazdagodtam. Ezennel köszönetet szeretnék mondani azoknak, akik valamilyen formában hozzájárultak dolgozatom elkészítéséhez.

Tőzsér Bélának, az Envihorizont Kft. Ügyvezetőjének, aki külső konzulensként nyitottságával, sokéves szakmai tapasztalatával és a téma iránti elkötelezettségével sokat segített és támogatta a témában folytatott kutatásomat. Rendelkezésemre bocsátotta, idején kívül cégének laboratóriumát is, a mérések elvégzéséhez.

Szabó Rékának, az Envihorizont Kft. munkatársának, aki a labor mérések elvégzésében segített nekem.

Szilágyi Ferencnek, a BME Vízi-közmű és Környezeti Tanszék tudományos munkatársának, aki belső konzulensként biztatott a konferencián való részvételre és tapasztalatával illetve szakmai ismereteivel, segített dolgozatom elkészítését, és megfelelő formába öntését.

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke.....	VI
Táblázatok jegyzéke.....	VII
Kivonat.....	VIII
Abstract.....	IX
1. Bevezetés.....	1
2. Szakirodalmi áttekintés.....	2
2.1. Mik is azok az algák?.....	2
2.2. Hol hasznosíthatóak az algák?.....	3
2.2.1. Bioenergetika.....	3
2.2.2. Biotechnológia.....	4
2.2.3. Környezet- és klímavédelem.....	8
2.3. Hogyan termeszthetőek? Algák tömegtermesztése – fotobioreaktorok.....	10
2.3.1. Nyílt medencék (open ponds).....	10
2.3.2. Sík reaktorok (flat plate).....	11
2.3.3. Csőreaktor (tubular → horizontal/serpentine/helical).....	12
2.3.4. Függőleges oszlopreaktor (vertical-column → bubble/airlift).....	13
2.3.5. Kompakt reaktorok – Piramidális reaktor.....	14
2.4. A természetet befolyásoló tényezők és hatásaik.....	17
2.4.1. Hőmérséklet.....	17
2.4.2. pH.....	17
2.4.3. Kevertetés – keveredési idő.....	18
2.4.4. Levegőztetés – CO ₂ bevitel.....	19
2.4.5. Megvilágítás.....	20
2.4.6. Szervetlen tápanyagok koncentrációja (C, N, P).....	21
2.5. A természet optimalizációjára használható módszerek.....	22
2.5.1. Empirikus módszerek.....	22

2.5.2.	Matematikai modellezési módszerek	22
2.5.3.	Mi is az a folyamat-szimuláció?.....	23
2.5.4.	Folyamatleíró egyenletek a szakirodalomban	24
3.	Kísérletek, módszerek	28
3.1.	Empirikus módszerek – laboratóriumban elvégzett kísérletek	28
3.2.	Matematikai modellezés a kísérletek alapján	32
3.2.1.	Folyamatleíró matematikai egyenletek szelekciója és adaptációja	32
3.2.2.	Paraméterváltozások szimulációja	33
4.	Eredmények és értékelésük	34
4.1.	Mérési eredmények.....	34
4.2.	Számítási eredmények	35
4.2.1.	Termelékenység	35
4.2.2.	Inhibíciós hatás.....	36
4.2.3.	Nitrogén/sejt átalakulási faktor	36
4.2.4.	Foszfor/sejt átalakulási faktor	37
4.2.5.	Beérkezett energia és a fajlagos energiaszükséglet.....	38
5.	Következtetések és javaslatok.....	42
5.1.	Következtetések.....	42
5.2.	Perspektívák az ipari alkalmazáshoz	43
5.3.	Javaslatok.....	44
	Összefoglalás.....	46
	Irodalomjegyzék.....	49
	Függelék	54

Ábrák jegyzéke

1. ábra Tipikus előfordulási formák: <i>Spirulina platensis</i>	2
2. ábra Nyílt medencés technológia, San Diego, Kalifornia	10
3. ábra Síkreaktor KSD company, Hattingen	11
4. ábra Csöves fotobioreaktor.....	12
5. ábra Buborékoltató oszlopreaktor, Plymouth Marine Laboratory.....	13
6. ábra Buborékoltató és légkeveréses oszlopreaktorok (Rorrer, 2004)	13
7. ábra Magyarországon tesztelt piramidális reaktor (<i>Tőzsér, 2012</i>)	14
8. ábra GreenFuel Technologies Co, Arizona, USA	15
9. ábra Mélyvízes rendszer.....	16
10. ábra Fényelnyelés a hullámhossz függvényében.....	20
11. ábra Minta 1	29
12. ábra Minta 2	29
13. ábra Minta 3	29
14. ábra Mérések fehér fény mellett.....	31
15. ábra Mérések narancsszínű fény mellett	31
16. ábra A fajlagos szaporodási sebesség hőmérsékletfüggése.....	34
17. ábra Morfológia: Minta 1	40
18. ábra Morfológia: Minta 2	40
19. ábra Morfológia: Minta 3	40

Táblázatok jegyzéke

1. Táblázat Hatóanyagok és potenciális hatások	5
2. Táblázat Genusok az élelmiszeriparban	7
3. Táblázat Zárt és nyílt rendszerek közti különbség a levegőztetés és CO ₂ ellátás alapján ...	19
4. Táblázat A legfontosabb tápanyagok ajánlott mennyisége	21
5. Táblázat AlgaeLink N.V. cég által előírt termesztési közeg összetétele.....	21
6. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek az szerveszén koncentrációt figyelembe véve	25
7. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a nitrogén koncentrációt figyelembe véve.....	25
8. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a foszfor koncentrációt figyelembe véve.....	25
9. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a fényintenzitást figyelembe véve	26
10. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek több paramétert figyelembe véve.....	27
11. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek különböző gátló hatásokat figyelembe véve.....	27
12. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a hőmérsékletet figyelembe véve.....	27
13. Táblázat A számítási menet eredményei	33
14. Táblázat A laboratóriumi és ipari technológiai elemek és körülmények összehasonlítása	35
15. Táblázat Az elvégzett számítások eredménye.....	39
16. Táblázat A laboratóriumi és ipari körülmények különbségeinek hatása.....	40
17. Táblázat Korrigált számítási eredmények	41
18. Táblázat Kereskedelemben kapható algatörzsek főbb technikai adatai	43

Kivonat

Napjainkban, mikor a környezet védelme egyre nagyobb hangsúlyt kap, az új fejlesztések, az alternatív nyersanyagok felhasználása és az ipari termelő folyamatok zöldítése egyre fontosabbá válik. A sok lehetőség között találunk egy olyan változatot, amely hatalmas potenciált rejt magában. Ez a lehetőség: az alga.

Munkám során röviden áttekintem az algák különböző alkalmazási területeit. Az algák, rendkívüli változatosságuk miatt nagyon sok területen alkalmazhatóak. Ezek közül kiemelhető a szennyvíztisztítás intenzifikálása, a gyógyászati és kozmetikai célok, élelmezési hasznosítás, vitamin vagy étrend-kiegészítő formájában, valamint a kőolajtartalékok rohamos fogyása miatt egyre fontosabbá váló energetikai célú felhasználás.

Célom optimális folyamat-szimulációs modell kiválasztása (tervezési és üzemeltetési paraméterszámításhoz, megfelelő technológiai-folyamatábra elkészítéséhez). Az optimális modell a későbbiekben megkönnyítheti a tervezési, üzemellenőrzési és folyamatszabályzási munkákat, és növelheti a hatékonyságot a folyamatos, sokoldalú termék-előállítás során.

Ennek elérése érdekében elvégeztem a folyamatleíró, matematikai egyenletek szelekcióját, és elkészíttem a megfelelő folyamatábrát. Mértem a hőmérsékletet, a pH-t, az elektromos vezetőképességet, a redox potenciált, az O₂ telítettséget és koncentrációt, a szén-, ammónium- és foszforkoncentrációt, a fényintenzitást és a sejtkoncentrációt. Ezután a mérési adatok alapján elvégeztem folyamat leíró egyenletek kiértékelését.

A kiválasztott modellek továbbfejlesztés után hasznosíthatóak lesznek a tervezésben és üzemellenőrzésben. Alkalmazhatóak lesznek klíma-, környezet-, egészségvédelem célokra, a bioenergetikában, modern táplálék- és takarmány előállítás során és egyéb, a mikroalgák termelését és hasznosítását célzó iparágakban itthon és külföldön egyaránt. A folyamatosan átalakuló, az algát, mint alternatív, megújuló nyersanyagot felhasználó ágazatok pedig képesek lesznek hozzájárulni a fenntartható jövőhöz.

Abstract

Nowadays when protecting our environment increasing emphasis on new development, the use of alternative resources and the transformation of the producing processes in environmental friendly way becoming more important. Between the many possibilities it can be found one, which has a large potential in it. This is the algae.

In this paper a brief review was made for different fields of application. Because of their rich diversity the algae can be used in many different fields. Intensification of wastewater treatment, therapeutic and cosmetic purposes, food and feed in form of vitamins, and diet supplements can be mentioned and last but not least perhaps the most important energetic utilization as the source of bio fuels, like biodiesel.

The goal is to select the optimal process-simulation model (for parameter calculation in planning and operation phase, for making suitable process flow diagram). In further application the optimal model can help to make easier the task of planning, operational and process controlling, furthermore increase the efficiency of the continuous and multi-faceted production.

To reach my goal, a selection of mathematical equation was made, describing the processes, and create the suitable process flow diagram. Measurement of pH, electrical conductivity, redox potential, oxygen saturation and concentration, carbon, ammonium and phosphorous concentration, light intensity and cell concentration was made for these purposes in algal suspension.

After further development the selected models, can be used in planning and operation control, also for climate-, environment- and health protecting purposes, in bioenergetics, in production of modern food and feed and in any other industrial field where the application of algae is possible and targeted as in Hungary as abroad.

1. Bevezetés

Napjainkban, mikor a környezet védelme egyre nagyobb hangsúlyt kap, az új fejlesztések, az alternatív nyersanyagok felhasználása és az ipari termelő folyamatok zöldítése egyre fontosabbá válik. A sok lehetőség között találunk egy olyan változatot, amely hatalmas potenciált rejt magában. Ez a lehetőség: az alga.

Munkám során röviden áttekintem a különböző alkalmazási területeket. Az algák, rendkívüli változatosságuk miatt nagyon sok területen alkalmazhatóak. Ezek közül kiemelhető a szennyvíztisztítás intenzifikálása, a gyógyászati és kozmetikai célok, élelmezési hasznosítás, vitamin vagy étrend-kiegészítő formájában, valamint a kőolajtartalékok rohamos fogyása miatt egyre fontosabbá váló energetikai célú felhasználás.

A fenti felsorolásból jól látható tehát, hogy a természeti kívánt biomassa komoly felvevőpiaccal rendelkezik. A piac stabil kiszolgálásához viszont stabil, üzemszerű termelés szükséges. A sok, természetet befolyásoló paraméter hatását több, külföldi, tudományos cikk is tárgyalja. Ezen paraméterek közül a legfontosabbak a levegőztetés – CO₂ bevitel, a pH, a hőmérséklet, a megvilágítás és a szerves tápanyagok koncentrációja (C, N, P). A nagy faji változatosság, egyben nagy különbségeket is jelent a termesztési körülményeket, és főleg az optimum tartományokat illetően. A stabil termesztéshez tehát fontosak az előzetes vizsgálatok kísérleti, fél-üzemi, majd üzemi méretekben.

Dolgozatom problémafelvetése a következőképpen fogalmazható meg. A jelenlegi hazai és nemzetközi gyakorlat empirikusan közelíti meg a mikroalgák szaporításának kérdéskörét, ami miatt igen magasak a beruházási és üzemeltetési költségek. A laboratóriumi eredmények ipari méretre történő alkalmazásakor pedig, a paraméterek nem mindig felelnek meg a technológiai lehetőségeknek.

Céлом optimális folyamat-szimulációs modell kiválasztása (tervezési és üzemeltetési paraméterszámításhoz, megfelelő technológiai-folyamatábra elkészítéséhez). Az optimális modell a későbbiekben megkönnyítheti a tervezési, üzemellenőrzési és folyamatszabályzási munkákat, és növelheti a hatékonyságot a folyamatos, sokoldalú termék-előállítás során.

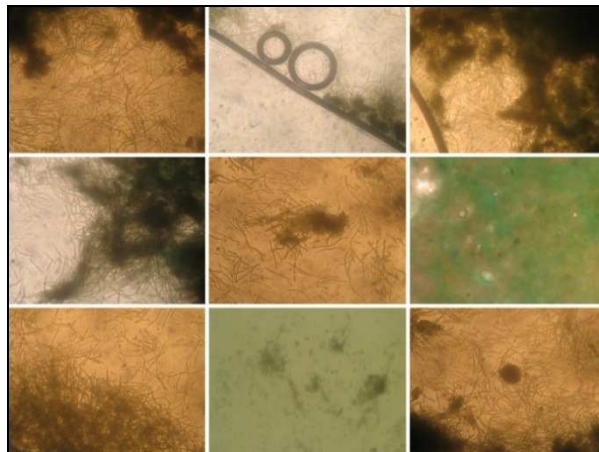
Vizsgálataim során első lépésben a folyamatleíró, matematikai egyenletek szelekcióját és adaptációját végeztem el, majd elkészítettem a megfelelő folyamatábrát. Második lépésben, a már felsorolt paraméterek hatását vizsgáltam a termesztés folyamatára. A változásokat, a minta könnyen és gyorsan mérhető jellemzőin keresztül követtem nyomon. Mértem a

hőmérsékletet, pH-t, elektromos vezetőképességet, redox potenciált, O₂ telítettséget és O₂ koncentrációt. Egy-egy mérési szakasz végén, pedig a szén-, ammónium- és foszfor koncentrációt, a fényintenzitást és a sejtkoncentrációt. Ezután a mérési adatok alapján elvégeztem a folyamat-leíró egyenletek kiértékelését, valamint az eredmények ipari folyamatokban való alkalmazási lehetőségeinek feltárását, törzstenyészeti és szakirodalmi adatok alapján.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Mik is azok az algák?

A mikroalgák tengeri vagy édesvízi környezetben élő, egysejtű fotoszintetikus mikroorganizmusok, melyek a napenergiát, vizet és szén-dioxidot alga-biomasszává alakítják át. (Ozkurt, 2009) Előfordulási formáik nagyon változatosak. Sejtjeik mérete pár mikrométertől több száz mikrométerig terjed. Megtalálhatóak egyedi sejtekként, formálhatnak láncokat vagy képezhetnek nagyobb, összefüggő telepeket (1. ábra).



1. ábra Tipikus előfordulási formák: Spirulina platensis

A mikroalgák, mint biomassza, egyike a Földön fellelhető, vitaminokban, fehérjékben és egyéb tápanyagokban leggazdagabb nyersanyagoknak. A különböző alga-törzsek eltérő sajátosságai lehetőséget adnak a széleskörű alkalmazásra, a terméként való felhasználásuktól, egészen a különleges technológiai részfolyamatok elvégzéséig.

A mikroalgák, becsülhetően 200.000-800.000 faja közül napjainkig kevesebb, mint 15%-ot határoztak meg a tudósok. A már megismert, és leírt 30.000-35.000 fajjal, a mikroalgák törzse ma még a kiaknázatlan erőforrások közé tartozik (Cardozo et al., 2007). Ezt az is mutatja,

hogy jelenleg ebből a több ezer fajból, csupán csak 15-öt találunk meg a mindennapi, kereskedelmi termelésben. (*Berg-Nilsen, 2006*)

A fotoszintézis folyamata a mikroalgák esetében hasonló a szárazföldi növényeknél megismert folyamathoz, de köszönhetően az egysejtű szerkezetnek és víz alatti életmódnak, ami hatékony hozzáférhetőséget biztosít a vízhez és CO₂-hoz, sokkal hatékonyabban képesek a napenergiát biomasszává alakítani, mint más növények. (*Carlsson et al., 2007*).

A nagy hatékonyságnak köszönhetően a biomasszán túl, metabolitok széles skáláját képesek előállítani. Ezek közül kiemelhetőek olyan egyedülálló termékek, mint a karotinoidok, antioxidánsok, zsírsavak (köztük a különösen fontos Omega-3), enzimek, polimerek, peptidek, fehérjék, toxinok és szterinek (*Cardozo et al., 2007*).

A fotoszintézis melléktermékként oxigént is termelnek. Becslések szerint a légköri oxigén közel fele az algáktól származik (*Cardozo et al., 2007*).

A mikroalgák primitív organizmusok, egyszerű sejtszerkezettel és nagy fajlagos felülettel, ami képessé teszi őket nagy mennyiségű tápanyag felvételére. (*Sheehan et al., 1998*). A növekedést biztosító közegnek tartalmaznia kell mindazokat a szerves elemeket, melyek segítik az algát sejtfalának kialakításában úgy, mint a nitrogén, foszfor, vas és esetenként a szilícium. (*Grobbelaar, 2004*).

A mikroalgák rendelkeznek sok egyedülálló és érdekes biokémiai tulajdonsággal, melyek több szempontból is egyre fontosabb szerepet játszanak a mindennapokban, a táplálkozástól egészen az energiatermelésig (*Sweetman, 2009*).

2.2. Hol hasznosíthatóak az algák?

2.2.1. Bioenergetika

Bioenergetikai szempontból jelentősek a közvetlen vagy közvetett biofotólízissel hidrogén előállítására képes, illetve a szén-dioxidot metánná átalakító fajaik. Számos kedvező sejtösszetételű fajból kinyert olaj alkalmas igen jó minőségű, a légi szállításban is alkalmazható biodízel előállítására. A magas szénhidráttartalmú algákból alga bioetanol és egyéb bioüzemanyag származékok nyerhetőek Otto-, és rugalmasan hajtott motorok (FFV) hajtóanyagának előállításához. Az algák, valamint az algatermékek hulladéka biogáz-fermentorok alapanyagához keverve kedvező gázkihozatalt és fűtőértéket eredményez, és javítja a fermentáció végén keletkező biotrágya talajerő-fokozó hatását, tehát a biogázüzemek

hatékonyságának növeléséhez és a tényleges nulla CO₂-kibocsátás megvalósításához is előnyösen alkalmazhatóak a mikroalgák és feldolgozási hulladékaik (mikroalga-biomassza). (Tózsér, 2012)

2.2.2. Biotechnológia

Biopolimeripar

A klasszikus műanyagokkal szemben, melyek alapanyaga a petróleum, a biopolimerek vagy természetes alapú műanyagok, olyan anyagok melyek megújuló, biomassza alapú nyersanyagból készülnek, mint például a növényi olajok vagy a kukoricakeményítő.

Kettős előnyük van:

- lehetővé teszik a fosszilis erőforrásokkal való takarékoskodást
- előállításuk során alacsonyabb a CO₂ emisszió

Az algák számos előnyös tulajdonságuknak köszönhetően, jól alkalmazhatóak biopolimer ipari alapanyagaként. Ezek között említhető a magas hozam vagy a szabályozott körülmények közti termesztetőség. Az algákból készült biopolimerek gyártása a bioüzemanyag gyártás során fejlődött ki, mint kísérő iparág.

Bár napjainkban ez a megoldás még gyerekcipőben jár, a jövőben az üzemi előállítás megvalósulásával, az alga-alapú biopolimerek széles körű alkalmazása várható (*oilgae.com*).

Műanyagtípusok, melyek előállításában az alga, mint alapanyag felhasználható (*oilgae.com*):

- *Hibrid műanyagok:*

Ezek a műanyagok előállításakor a hagyományos petróleum-alapú műanyagokhoz denaturált alga-biomasszát adagolnak töltőanyagként.

- *Cellulóz-alapú műanyagok:*

Ez a biopolimerek legrégebbi formája. Ennél a típusnál csak azok az algatörzsek alkalmazhatóak hatékonyan, melyek extrakciója után a kinyert algaolaj legalább 30%-ban tartalmaz cellulózt.

- *Politejsav (PLA):*

Ezt a típust már jelenleg is használják, a műanyagok biodegradálható alternatívájaként. A politejsav monomerje legegyszerűbben az alga-biomassza fermentációjával állítható elő.

- *Bio-polietilén:*

A polimerizációhoz használt monomer, az etilén, legegyszerűbben etanolból állítható elő. Etanol pedig kinyerhető az algából közvetlenül vagy az alga-biomassza rothasztása után.

Funkcionális élelmiszerek

Sokféle, sokszor téves találgatás és meghatározás él a köztudatban, arról mi számít funkcionális élelmiszernek. Az Európai Bizottság 2010-ben megjelent kiadványában, a Functional Food Science in Europe (FUFOSE) program által javasolt definíció szerint (European Commission, 2010).

„Olyan élelmiszer, amely rendeltetésszerű tápláló hatásán túl, előnyös hatással van az emberi test egy vagy több életfunkciójára, értékelhető mértékben javítva az általános egészségügyi állapotot és jól-létet, és/vagy csökkentve a betegségek bekövetkezésének kockázatát. Fogyasztható a mindennapi étrend részeként. A fogyasztási formát tekintve pedig nem pirula, kapszula vagy más étrend-kiegészítő.”

Előnyös hatásukat a bennük megtalálható élettani szempontból aktív komponenseknek köszönhetik, melyek más, normál élelmiszerekben nem, vagy csak kis mennyiségben találhatóak meg. Ezek közül a legfontosabbakat, melyek mikroalgákból is kinyerhetőek, az *1. táblázatban* foglaltam össze, összesítve a hatóanyagokat és a bizonyított vagy potenciális hatásokat.

1. Táblázat Hatóanyagok és potenciális hatások

Komponens	Hatóanyag	Hatás
Növényi rostok	Galaktózok: Galaktóz-szulfát	Csökkentik a székrekedés, vastagbélrák, túlsúly, magas koleszterinszint és cukorbetegség kialakulását
Poliszacharidok	Fukózok: Xilofukóz, Fukóz-szulfát	Vírusellenes hatás a herpesz különböző típusai és a humán cytomegalovírus (HCMV) esetén
Antioxidánsok	E-vitamin β-karotin	Védelem a normál metabolizmus és külső hatások által generált folyamatokban képződő reaktív oxigénnel szemben
Többszörösen telítetlen zsírsavak	Omega 3 (ω3) Omega 6 (ω6)	Szív és érrendszeri panaszok (koszorúér problémák, trombózis, érlelmeszesedés) visszaszorítása
Szterinek	Fitosztein	A koleszterinszint csökkentése

(Plaza, 2008 és Efterpi, 2012 alapján saját összeállítás)

Modern takarmányok

Napjainkban a föld lakossága már meghaladta a 7 milliárdot. Szakértők szerint, ez a szám 2030-ig 1,5 milliárddal fog nőni. A népesség folyamatos növekedésével együtt, a húsfogyasztás is folyamatosan növekszik, ami magával hozza a növekvő takarmányszükségletet is. A mikroalga egyike azon, a természet által felkínált, nagy potenciállal rendelkező erőforrásoknak, amely a későbbiekben képes lesz kiszolgálni a növekvő igényeket.

Mindazokon a táplálkozási előnyökön túl, melyeket a mikroalga, mint takarmány magában hordoz a magasabb szintű növényi szervezetekkel szemben, melyek talán egészséget hozhatnak az állatoknak, ez az egyetlen olyan biomassza, amely lehetővé teszi a természet, akár mindennapos betakarítással is az év minden napján.

Csak úgy, mint magasabb szintű társaiknál, az elfogyasztott tápanyagok összessége a mikroalgák esetében is fehérjékből, szénhidrátokból, lipidekből és nyomelemekből áll, a megfelelő vitaminokkal, antioxidánsokkal együtt. (*algae4feed.org*)

Fontos előnyök a hagyományos takarmánnyal szemben (*algae4feed.org*):

- Jó hozammal, akár naponta betakarítható, az év minden napján.
- A mikroalga fehérjék esetében, nagyobb az aminosavak aránya, mint a legjobb növényi fehérjeforrásoknál. Pl.: A *Chlorella sp* több esszenciális aminosavat tartalmaz, mint a fehérjében gazdagnak tartott szójabab.
- Nagyobb mennyiségben tartalmaznak vitaminokat és nyomelemeket, mint más kereskedelemben elérhető takarmányok és ezek nagyjából biológiailag jól hozzáférhetőek.
- A kérődző állatok (szarvasmarha, juh, kecske) táplálására a mikroalgák un. by-pass fehérjéket és zsírokat tartalmaznak, melyek fokozzák a takarmányhasznosítást és mérséklik a bendőgáz mennyiségét (klímavédelmi hatás) (*Tőzsér 2012*)

Humán étrend: Élelmezési célú felhasználás – Egészségügyi célok:

Az egészséges táplálkozás előretörésével különböző fórumokon újabb és újabb alternatívákat látunk étrendünk gazdagabbá tételére. Ezek közé tartozik az alga is, mint magas fehérjetartalmú, szénhidrátokban és vitaminokban gazdag, kiváló tápértékű növényi táplálék.

Tápértékén túl a legtöbb alfafajnál bizonyítható egészségügyi hatásokat mutattak ki. Ezeket a 2. táblázat foglalja össze. A több ezer törzs közül tipikusan négyet, ötöt találunk meg a különböző termékek között. Az éves mikroalga biomassza hozam közel 10.000 tonnára tehető.

A kereskedelemben, több formában is elérhető, legtöbbször tablettás vagy kapszulás kiszerelésben, illetve oldott formában, cseppeként vagy akár üdítőitalként találkozhatunk vele. Kémiai összetételüknek megfelelően étrend-kiegészítőként vagy természetes színezékként használhatóak tészták, chipsek adalékanyagaként kék, zöld, vörös, barna, lila és sárga színeket kölcsönözve. A piaci kereslet kielégítésére hatalmas termelő egységeket építettek ki a világ, vezető biotechnológiai vállalatai. Ezek elhelyezkedés és évi termésadatai a 2. táblázatban láthatók:

2. Táblázat Genusok az élelmiszeriparban

Genus	Egészségügyi hatás	Termelési volumen [tonna/év]	Legnagyobb termelő
<i>Arthrospira spp</i> (<i>Spirulina spp</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Mérsékli a koleszterinszintet • Csökkenti a magas vérnyomást • Védelmet nyújt vesebajok ellen • Segíti a szervezeten belüli Lactobacillus szaporodását • Akadályozza a vírusok osztódását • Segíti a vérképzést 	3000	Kína, India, USA, Mianmar, Japán,
<i>Chlorella</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Immunerősítő • Csökkenti a koleszterinszintet • Leköti a szabadgyököket 	2000	Tajvan, Japán, Németország
<i>Dunaliella spp</i> <i>Salina spp</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Rákmegelőző → béta-karotin 	1200	Ausztrália, Izrael, USA, Japán,
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Rákmegelőző - Gyulladáscsökkentő - Növeli az idegrendszert segítő anyagok mennyiségét a vérben (EPA, DHA, omega3) 	500	USA,

(Flammini, 2011 és Spolaore, 2006 alapján saját összeállítás)

Kozmetikai célok: wellness-, thalasso- és balneoterápia

Napjainkban a wellness már komoly iparággá vált. Szállodaláncok álltak rá teljes hétvégén át tartó kúrák lebonyolítására. A kúrák kínálatát végignézve egyre nagyobb népszerűségnek

örvendenek a különleges, nem mindennapi kezelések. Fürdők adalékként vagy pakolásokban sok helyen találkozhatunk valamilyen algakészítménnyel.

A fent említett kezelések közül kiemelkedő a thalassoterápia. A görög thalassa (tenger) és therapeia (gyógyítás) szavak együtteseként áll elő a thalassoterápia fogalma. A thalassoterápia olyan kezeléseket jelent, melyekhez gyógyító és ápoló hatású tengeri anyagokat, algákat és iszapot használnak fel. A definíció Joseph de la Bonnadiere 1865-ben, a Montpellier Egyetemen megjelent doktori értekezéséből származik (*Charlier, 2009*).

Az összefoglaló néven Spa terápiáknak nevezett kezelések másik, algákat is alkalmazó ága, a balneoterápia, amely több, egymást követő fürdőből áll. Az algákkal a kezelések során különböző finomságú porok, eltérő hígítású zselék vagy egyéb, a kezelésnek megfelelő formában találkozhatunk (*Charlier, 2009*).

Mivel az algák nyomelemeket, vitaminokat, aminosavakat és ásványi anyagokat koncentráltan tartalmaznak, így alkalmasak lehetnek a bőr frissítésére, táplálására. Egyes jól bizonyítható hatásokon (rákellenes hatás, mozgásszervi problémák gyógyítása) túl, az algák alkalmazásakor tapasztalható egyéb kedvező hatásokat illetően napjainkban még nincs egységes szakmai állásfoglalás (*Charlier, 2009*).

2.2.3. Környezet- és klímavédelem

Az algákat felhasználó technológiai rendszerek sokoldalú lehetőségeket kínálnak, minden olyan területen, ahol a keletkező üvegházgázok (ÜHG), illetve CO₂ megkötése is cél. A technológiát célszerű az adott környezet káros adottságainak kihasználásával kiépíteni (CO₂ emissziós források, szennyvízkibocsátások, egyéb erjeszhető anyagok termelődése, stb.).

Ezek között a területek között kiemelt az energiaszektor, szinte minden vonatkozásában. Az erőművektől kezdve, a gázmotorokon át, a hőközpontokig, minden állomásnál komoly CO₂ terheléssel számolhatunk. Ezek mellett természetesen nem hanyagolható el a különböző kőolajalapú üzemanyagok előállításakor és felhasználásakor keletkező CO₂, légköri mennyiséghez való hozzájárulása. A tipikusan nagy kibocsátású iparágak közé sorolható még az építőipar, hatalmas cementgyáraival és mészégetőivel. Meglepő módon a biomassza-hasznosító erőművek, biogáz- és bioetanol üzemek (CO₂-kvóta rendszerben nulla kibocsátások) ténylegesen jelentős ÜHG emisszióval terhelik a környezetet. De az algák alkalmazása ezekben az üzemekben gyorsítja a folyamatot, lehetővé téve a nulla karbon emissziót, mérsékelve a levegő ÜHG- és bűzterhelését, emellett pedig a fermentációs maradék

környezetbarát, a talajbaktériumok által könnyen hasznosítható, biotrágyaként hasznosítható. (Tózsér, 2012).

Levegőtisztaság-védelmi szempontból a fent említett hatásokon túlmenően mikrolga- töltetek alkalmazhatóak a szennyezett légterek tisztításánál (klímaberendezések, ipari gázemissziók) A mindennapokban megszokott légtereken túl az alga-alapú légkondicionálást a NASA kutatói is vizsgálják, és alkalmazzák űrsiklókban is (Nienow, 2000)

A jelenlegi egyik legígéretesebb alkalmazás a szennyvíztisztító telepek biológiai fokozatának intenzifikálása. Az algák ilyen esetben a biológiai tisztítást végző baktériumokkal szimultán végzik a tisztítást, azok szennyezőanyag-lebontó kapacitását növelik, a keletkező CO₂-ot megkötik és C, N, P sótartalom felvétele mellett növelik a képződő fölösiszap talajjavító hatását (Tózsér, 2012).

A szennyvíztisztítás hatásfok növelését elősegíti a mikroalgák által az eleveniszapos medencékben termelt oxigén. A baktériumokhoz viszonyított gyorsabb szaporodásuk lehetővé teszi a tisztítást végző berendezések térfogatának mérséklését. A mikroalgákkal dúsított eleveniszap ülepedési és vízleadási (sűrítés, víztelenítés) tulajdonságai javulnak, így visszafogható a víztelenítési polimer felhasználása és csökken a környezetterhelést okozó úszóiszap mennyisége (Tózsér, 2012).

Termásvíz alapú szennyvizek és használt vizek magas sótartalmuk miatt komoly veszélyt jelentenek a felszíni befogadók élővilágára, ha a bebocsátást nem előzi meg megfelelő kezelés. Emiatt az eredeti földtani közegbe való visszasajtolás lenne a megoldás, de ez napjainkban nagyon költséges, és nem ismert hatásokat generálhat. Ezen vizek algákkal történő sótelenítésével megelőzhető a sóterhelés és a kezelt víz felszíni befogadóba való kiengedésével elkerülhető az energia- és költségigényes visszasajtolás. Következésképpen a mikroalgás intenzifikálás környezetterhelés, beruházási és üzemeltetési költségmérséklő.

További fontos felhasználási lehetőség a környezetvédelem terén a veszélyes hulladékok ártalmatlanítása. Példaként említhető a radioaktív szennyezések mérséklése, melynek alapja az egyes mikroalgák dekontamináló és sugárzásmérséklő hatása. Az emberi egészség védelmére, pedig alkalmazhatóak jódtartalmú algák, melyekkel helyettesíthető a sugárzás káros hatása ellen használatos káliumjodid (Tózsér, 2012)

A számos felhasználási lehetőség között említhető a szennyezett talajok regenerálása, ahol a mikroalgák toxikus fém-szelektivitását (Cd, Hg, Zn, Cu) alkalmazzák a szennyezett talajok

kármentesítő eljárásokban (pl.: a vörösiszappal szennyezett kolontári területek) (Tózsér, 2012).

Végül lehetséges a talajerő pótlása algakészítményekkel a műtrágya használatának visszaszorítására (Tózsér, 2012). A Mosonmagyaróvári Főiskolán 1980-as években kidolgoztak egy szabadalmat, Ördög Vince nevéhez fűződően. A szabadalom lényege, hogy nagy alगतartalmú vizet használnak öntözésre, ezáltal az optimális tápanyagarányt biztosítva a mezőgazdasági kultúrák számára (Szilágyi, szóbeli közlés).

2.3. Hogyan termeszthetőek? Algák tömegtermesztése – fotobioreaktorok

A mikroalgák jelentős távlatokat nyitnak a környezetmérnöki alkalmazásokban sokszínű lehetőségeikkel: szennyvíztisztítás, levegővédelem, talajvédelem, sugárvédelem

Az algák termesztésének a 2.2.3. fejezetben kiemelt környezetvédelmi jelentőségén túl, az intenzív nyílt vagy zárt termesztő rendszerek esetében kiemelhetőek további előnyök.

Az energetikai felhasználású algák szaporításához a legtöbb esetben alkalmazható termesztőközegként szennyvíz, ami az ivóvízfogyasztás visszafogásán túl hozzájárul a szennyvíz szennyező tartalmának csökkentéséhez.

Emellett a metabolizmus folyamán történő fokozott oxigéntermeléssel az algáüzemek környezetük levegőminőségét javítják, a szennyvíztelepek, biogázüzemek bűzemisszióját eredményesen mérsékelhetik.

A különböző termesztési módozatokat a következőkben tekintem át.

2.3.1. Nyílt medencék (open ponds)



2. ábra Nyílt medencés technológia, San Diego, Kalifornia

Természetes megvilágítású reaktorok, jellemzően nagy megvilágítási felülettel (Ugwu C.U. et. al., 2008). Alakjuk legtöbbször a versenypályára hasonlít. Mélységük a fotoszintézishez szükséges fény megfelelő eloszlása miatt, nem több 30 cm-nél. A homogenizálást, általában motorral működtetett lapátkerek végzik, melyek segítik az alga és a tápanyag találkozását, illetve növelik a beoldódó oxigén és szén-dioxid mennyiségét. (Zemplényi, 2010)

- Természetes tavak, lagúnák, medencék
- Mesterséges medencék, konténerek
- Előnyök:
 - Egyszerűbb kivitelezés,
 - Könnyebb üzemeltetés
 - Gazdaságos megoldás
- Hátrányok:
 - Alacsonyabb fényhasznosítási hatások a sejtekben
 - Párolgási veszteség
 - CO₂ diffúzió a légkörbe
 - Nagy területigény
 - Elszennyeződés ragadozók vagy más gyorsan szaporodó heterotrófok miatt
 - Alacsony keverési hatékonyság → alacsony fajlagos szaporodási sebesség → alacsony hozam

2.3.2. Sík reaktorok (flat plate)



3. ábra Síkreaktor KSD company, Hattingen

Az 1950-es évektől gyors egymásutánban jelentek meg cikkek újabb és újabb konstrukciókról, melyek főleg a részletmegoldások módjában különböztek. Elsőként természetes fényre támaszkodó reaktorok születtek, ezután energiatakarékos izzókat

alkalmaztak, később a LED típusú fényforrások térhódítása következett (Ugwu C.U. et. al., 2008).

- Előnyök:

- Nagy megvilágítási felület
- Jól használható kültéri termesztésre
- Magas fotoszintetikus hatékonyság
- Viszonylag olcsó
- Könnyen tisztítható
- Könnyen szabályozható → egyszerű ellenőrzés/mérés

- Hátrányok:

- Alacsony az elérhető legmagasabb oldott oxigén (DO) koncentráció
- A méretnövelés sok lépésben, nagy anyagi ráfordítással lehetséges
- Az algakultúra hőmérséklete nehezen szabályozható
- Egyes algatörzsek esetén hidrodinamikai stressz léphet fel

2.3.3. Csőreaktor (tubular → horizontal/serpentine/helical)



4. ábra Csöves fotobioreaktor

A kültéri termesztésre legalkalmasabb konstrukció a csőreaktor. A csőrendszer általában üvegből vagy jó fényáteresztő-képességű műanyagból készül, átmérője 10 cm körül van. A belső algakultúra kevertetésére pedig jellemzően szivattyúkat vagy légkeveréses technikát alkalmaznak (Ugwu C.U. et. al., 2008).

Formái:

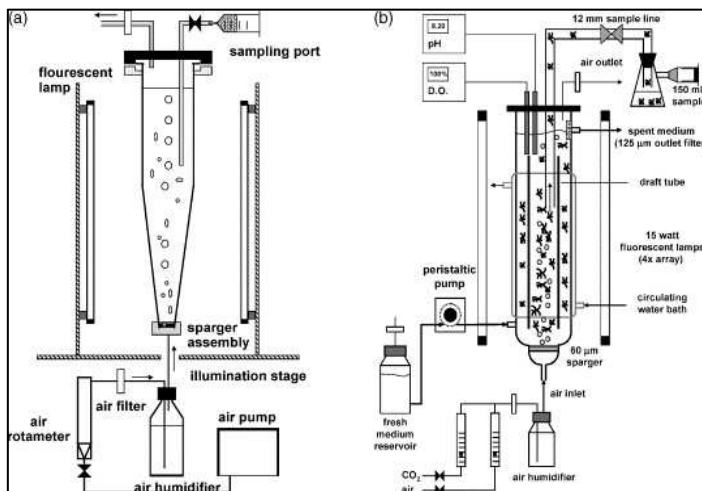
- Vízszintes
- Kanyargó, kígyózó
- Ferde, közel vízszintes
- Spirális
- Kúp alakban felcsavart
- Függőleges

- Előnyök:
 - o Alkalmas kültéri termesztésre
 - o Nagy, megvilágítható felület
 - o Magas oldott oxigén (DO) szint érhető el
- Hátrányok:
 - o Alacsony hozam → méretnöveléskor komoly probléma
 - o Nem egyenletes a fényeloszlás → önárnyékolási problémák, jó kevertetéssel visszaszorítható
 - o Nehezen kontrollálható a hőmérséklet → plusz termosztát beépítése szükséges
 - o Jellemző a sejtek letapadása a csőfalon
 - o Túl hosszú csőszakasz esetén nem egyenletes az oxigén és szén-dioxideloszlása → gradiens alakul ki
 - o A pH növekedésével nő a CO₂ visszaoldódása, ami növeli a termesztés költségeit

2.3.4. Függőleges oszlopreaktor (vertical-column → bubble/airlift)



5. ábra Buborékolató oszlopreaktor, Plymouth Marine Laboratory



6. ábra Buborékolató és légkeveréses oszlopreaktorok (Rorrer, 2004)

Általában jó fényáteresztő-képességű anyagból készült oszlopok, melyeket sorba kötve alkalmaznak (5. ábra). A kevertetést buborékoltató rendszer vagy légkeverő rendszer biztosítja (6. ábra). A csövek átmérője 10-15 cm, magasságuk 2 m körül van. (Ugwu C.U. et. al., 2008)

- Előnyök:

- o Alacsony energiafogyasztás → alacsonyak az üzemeltetési költségek
- o Jól kivitelezhető a méretnövelés → jó kilátások a termesztésre nagy méretben is
- o Magas hozam
- o Jó keverhetőség, alacsony nyíróerő mellett
- o Könnyen fertőtleníthető
- o Kicsi az önárnyékolás és a fotooxidáció mértéke

- Hátrányok:

- o Kicsi a megvilágítható felület → méretnöveléskor ennek területe folyamatosan csökken
- o Kialakítása bonyolult eszközöket igényel
- o Nem megfelelő kevertetés esetén megnő a bevitt nyíróerő → stressz hatás az algák számára

2.3.5. Kompakt reaktorok – Piramidális reaktor



7. ábra Magyarországon tesztelt piramidális reaktor (Tőzsér, 2012)

A Soley Institut által 2010-ben szabadalmaztatott rendszert az 7. ábrán látható módon négy darab egymás felé fordított háromszög alapú hasáb alkotja. A megvilágítás intenzitásának állandó értéken tartására a napfény csökkenésével együtt indul be a belső megvilágítási rendszer, így biztosítható az állandó és magas hozam. A megvilágítás speciális, He-Ne-Mg/Al

fénycsővekkel történik, amelynek köszönhetően magasabb lesz a sejtek klorofill tartalma és emellett fertőtlenítő hatás is érvényesül. A reaktor falának anyaga polimetil-metakrilát (PMMA), amely rendkívüli ellenálló képességén túl, kis pórusméretének köszönhetően megakadályozza az algák falhoz tapadását. A hátrányokról nem állt rendelkezésemre adat (*soleybio.com*).

- Előnyök:

- Magas szintű rendszer monitoring → állandó pH, hőmérséklet, oldott O₂, oldott CO₂, fény, kevertetés, algakoncentráció átlagos érték, monitoring
- Speciális reaktortagolás → hőmérsékleti veszteségek elkerülésére
- Minden folyamat és tartozék teljesen ellenőrzött → Akár automatikus rendszer adminisztrátori figyelmeztetés (internet/telefon), ha a betáplált anyagok (vegyszerek, tápanyagok) mennyisége nem elegendő
- Számítógép vezérelt, automatikus adatrögzítés
- Ellenálló rendszertartozékok
- Automatikus hűtő/fűtőrendszer a helyi körülményektől függően
- UV sterilizációs technológia

Ezeket túl megemlíthető még a *zsákos tenyésztési módszer*, ahol a reaktorteret műanyag zsákok alkotják a 8. ábra szerinti elrendezésben. Napjainkban ez még nem túl kifinomult módszer. Rendkívül alacsony költségein kívül semmilyen más előnnyel nem jár, hiszen megbízhatósága kérdéses, hozama pedig jóval az eredményes technológiák mögött van (*Zemplényi, 2010*).



8. ábra GreenFuel Technologies Co, Arizona, USA

Említésre méltók még, a különleges, alacsony klorofill-tartalmú algafajok termesztésére alkalmas, a 9. ábrán látható *mélyvizes rendszerek* (*Zemplényi, 2010*). A klorofill-tartalommal

összefüggő előnyöket a felsorolás mutatja. A hátrányokról ebben az esetben sem áll rendelkezésemre adat.

- Előnyök (az alacsony klorofill-tartalom miatt):
 - o kisebb fényelnyelés → a fényintenzitás lassabban csökken
 - o mélyebbre ér el a fény → növekszik a területegységre vonatkoztatott hozam
 - o kevesebb hőfelvétel → kisebb a túlmelegedés rizikója



9. ábra Mélyvízes rendszer

Végül pedig, idesorolhatók még az *intenzifikált, fotobiokatalitikus reaktorok*, melyek a közeg sebesség-gradiensének optimalizálásával elősegítik a mikorbuborékos gázbevitel, a diffúzió általi gázbeoldódás, a sejt-recirkuláció és az „aratás” hatékonyságának növelését. Ennek köszönhetően a fent említett reaktortípusokhoz képest jelentősen növelhető a termelési kapacitás és akár a FDT (fast duplication time) szerinti termelési állapot is elérhető (Tózsér, 2012).

Az IFR-k kínálják a legtöbb lehetőséget az alapvetően biotechnológiai alkalmazás környezetvédelmi célú felhasználására. (intenzifikáló közeg, enzimkoncentrátum, fermentáció gyorsító, iszapstabilizáló a szennyvíztisztításhoz, a hulladéklerakók csurgalékvizének kezeléséhez, a biogázüzemek hígfázisa környezetterhelésének mérsékléséhez, levegőtisztaság-védelemhez, talaj- és sugárvédelemhez a hatékony több termelő vonalas üzemek létesítésével), ami meghatározója a fenntartható klíma-, környezet- és egészségvédelemnek, a kapcsolt bioenergiatermeléssel pedig a környezetvédelmet igen kedvező gazdaságossági mutatókkal oldják meg (Tózsér, 2012).

2.4. A termesztést befolyásoló tényezők és hatásaik

2.4.1. Hőmérséklet

Az optimum hőmérsékletet tekintve három tartományt különböztethetünk meg (*algae.wur.nl*):

- **Pszichrofil:** Jellemzően 0 °C alatt, vagy pár fokkal felette. Az ebbe a körbe tartozó mikroalgák jellemzően a sarkkörüi vidékeken fordulnak elő.

Pl.: Diatomák (kovaalgák): *Nitzschia* és *Amphiphora*
Cryptomonas (két ostoros) nemzetség: *Chlamydomonas*
Zöld algák: *Chlorella*

- **Mezofil:** Optimum tartományuk a pszichrofil és termofil fajok által be nem népesített 5 - 40 °C közötti tartomány. A széles határok miatt rendkívüli faji változatosság figyelhető meg. Az egyes törzsek érzékenysége eltérő lehet. Vannak fajok, melyek a két küszöb érték között bármilyen hőmérsékleten jól érzik magukat, míg más fajoknál sokkal szűkebb a túrés határ.
- **Termofil:** Az ide tartozó fajok életképesek akár 75 °C-ig is. Jellemzően meleg vizű források környékén élnek.

Pl.: Cyanobacteria (kék moszatok): *Synechococcus* and *Synechocystis*

A hőmérséklet hatása az mikroalgák metabolizmusára, a szaporodáson és a fotoszintézisen túl kiterjed a sejtek összetételére és a rövidtávú tápanyagfelvételre is, kiemelten a nitrogén háztartásra, amely különösen érzékenyen függ a hőmérséklettől. (*Berges, 2002*)

Az iparban jól alkalmazható algakultúrák számára az optimális hőmérséklet általában 20 °C – 30 °C között van, ez törzsenként eltérő lehet. Az ipar számára hasznosítható mikroalgák jellemzően a mezofil hőmérsékleti tolerancia tartományból kerülnek ki, 25 °C körüli optimummal. 16 °C alatt még megfigyelhető a növekedés, de a maximális fajlagos szaporodási sebesség (μ_{\max}) nagyon alacsony lesz. 35 °C felett a fehérjék koagulációja miatt, letális hatások figyelhetők meg. (*algae.com*)

2.4.2. pH

A legtöbb mikroalga törzs esetében a környezeti tényezőket tekintve megfigyelhető egy optimális tartomány. A pH esetében az optimum általában semlegeshez közeli tartományban pH=6 és pH=8 közé tehető. A pH tolerancia fajonként eltérő lehet. Léteznek savas

környezetet (*Chlorococcum littorale*) és lúgos környezetet (*Spirulina platensis*) jobban toleráló fajok (*researchalgae.com*). Ezek természetes élőhelye is nagyban eltér egymástól.

Korai megfigyelések írták le, hogy egymástól nem messze található mészkő alapkőzetű tavakban (pH 7,6-9,2) és gránit alapkőzetű tavakban (pH 6,2-6,8) gyökeresen eltérő volt a fellelhető algák faji összetétele. (Reed, 1924).

Kísérletek bizonyítják, hogy a pH csökkentésekor, (pH 5,0-6,5) az algák aktivitása nő. (Leavitt, 1999). Ebből kiindulva következtették ki, hogy fordított esetben (pH 9,5) az aktivitás csökken, amit pH toleráns fajokkal bizonyítottak. (Penderson, 2003).

A termeszto közeg pH értéke több tényezőtől függ (Richmond, 2004):

- $\text{CO}_2\text{-HCO}_3$ puffer rendszer ($\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}$) kapacitásától
- Algák által felhasznált nitrogénforrás formájától:
 - o Ha a szükséges nitrogén ammónium (NH_4^+) formájában érhető el, a pH csökkeni fog a termeszto közegbe leadott protonok (H^+) miatt
 - o Ha az algák a nitrogént csak nitrát (NO_3^-) formájában tudják felvenni, a pH növekedni fog. Az így kialakuló magas pH hozzájárul a vízben levő ammónium párolgás útján történő csökkenéséhez.

2.4.3. Kevertetés – keveredési idő

A keverés mechanikusan vagy nem mechanikusan valósítható meg.

Mechanikus esetben különböző keverőelemeket lehet alkalmazni, a keverőelem típusától függ a bevitt nyíróerő nagysága. A kevertetni kívánt alगतömeg térfogatától függően kell kiválasztani a megfelelő keverőelem típust.

Nem mechanikus esetben az ún. Air-lift típusú gáz/levegőkevertetést alkalmaznak, ami bár nem biztosít olyan intenzív keverést, mint a mechanikus keverők, de bizonyos térfogat felett (200 m^3) a mechanikus keverők használata már nehézkes (Litkei, 2010).

A megfelelő kevertetés szerepe a fotobioreaktorban (Ugwu C.U. et. al., 2008):

- Magas sejtkoncentráció biztosítása.
- A sejtek szuszpenzióban tartása.
- A tápanyagok megfelelő eloszlásának kialakítása, felvételük elősegítése.
- Az önárnyékolás mértékének csökkenése, a világosabb és sötétebb területek átkeverésével.

- A sejten belüli gázcsere elősegítése.
- Hőmérsékleti rétegződés megakadályozása.

2.4.4. Levegőztetés – CO₂ bevitel

A fotoszintézis során az algák, mint fototróf élőlények a nap energiáját és a rendelkezésre álló CO₂-ot különböző metabolitokká alakítják át, melléktermékként oxigént termelve. A zárt termesztő rendszerekbe a levegőt és vele együtt a szükséges CO₂-ot buborékolatással juttatják be. A levegőztetés miatt keletkező buborékok és turbulens áramlások segítik a gáz-folyadékérintkezést és diffúziót, ezzel növelve a CO₂ felhasználását a fotoszintézis során. A túl erős levegőztetésnek azonban már hátrányos hatásai lehetnek. A fotoszintézis során az algák oxigént is termelnek a különböző metabolitok mellett, ami folyamatosan emeli a víz oldott oxigéntartalmát. Ennek mennyisége a termesztő közegben a fajlagos szaporodási sebességgel és a hozammal arányosan nő. Az oldott oxigénben túltelített környezet viszont gátló hatással van az algák növekedésére. Ez azonban nem okoz gondot zárt, levegőztetett rendszerek esetén, ahol a DO értéke nagyjából állandó, mivel a levegő buborékok abszorbeálják és eltávolítják a rendszerből a növekményt. A CO₂ folyamatos bejuttatása befolyásolhatja a pH-t csökkentve azt, melynek gátló hatása van az algák szaporodására (a gátlás kiváltó pH értéke fajonként eltérő) azonban a befúvatott levegő alacsony CO₂ tartalma miatt ez a hatás nem jelentős (Zhao, 2011).

A zárt és nyílt rendszerek közötti jelentős különbségeket az 3. táblázat szemlélteti.

3. Táblázat Zárt és nyílt rendszerek közti különbség a levegőztetés és CO₂ ellátás alapján

Termesztési mód	Összes biomassa sűrűség		Növekedési paraméterek		CO ₂ megkötési jellemzők	
	X ₇ nap (g/L)	nap	k (1/nap)	p (Y) (g/L/nap)	F _{CO2} (g CO ₂ /L/nap)	f _{CO2} (g CO ₂ /g sejt/nap)
Nyílt	1,1250		0,2878	0,1393	1,2559	1,7058
Zárt	5,4075		0,5121	0,7511	1,3784	9,1894

(Zhao, 2011)

μ (k) - Fajlagos szaporodási sebesség (*Specific growth rate*)

Y (p) – Hozam (*Biomass productivity rate*)

F_{CO2} - CO₂ megkötési arány (*CO₂ fixation rate*)

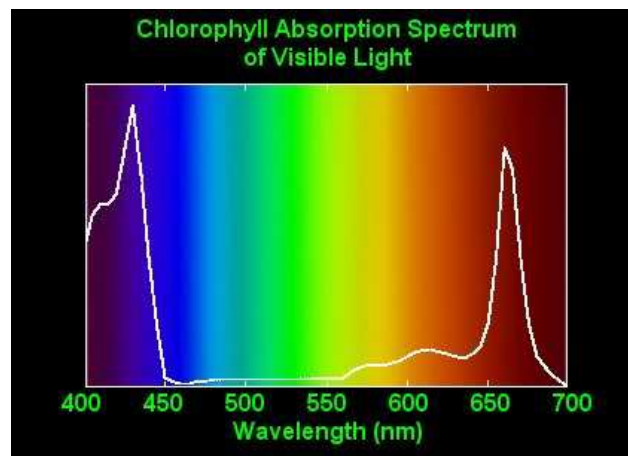
f_{CO2} – CO₂ megkötési arány a kezdeti beoltott sejtömege vetítve (*CO₂ fixation rate per initial inoculation mass*)

2.4.5. Megvilágítás

Mivel a mikroalgák fototróf élőlények, életfunkcióik működtetéséhez szükségük van elektron akceptoron (CO₂) kívül fényre is, ami a fotoszintézis során lezajló kémiai folyamatokhoz szolgáltatja az energiát.

A besugárzott fény az algaszuszpenzióban nem tud mélyre hatolni, mert útja során vagy szóródik, vagy elnyelődik a sejtekben (Yun and Park, 2001). Átlagos úthossza nyitott tavaknál, kevertetés nélkül, nem több mint 30 cm. Mélyebb reaktortípusoknál intenzív kevertetéssel oldják meg a sejtek fényhez jutását, úgy hogy a meglévő sejtkoncentráció még elfogadhatóan magas legyen. Túl nagy sejtkoncentráció esetén fellép az önárnyékolás. A sejtek egymás elöl takarják el a fényt, így hiába növeljük a sejtkoncentrációt, a hozam nem fog változni (Yun, 2003).

Kutatások egyaránt vizsgálták a beeső fény intenzitásának és hullámhosszának hatásait. Megfigyelték, hogy az intenzitás növelésével, adott sejtkoncentráció mellett, az aktivitás egy ideig növekedve maximum értéket ér el. A hullámhossz vizsgálatokor zöldalgáknál megfigyelték, hogy aktivitásuk nagy hullámhosszú, vörös fényre nagyobb, mint kisebb hullámhosszú sárgára, zöldre (Yun, 2003). Ezt szemlélteti a 10. ábra.



10. ábra Fényelnyelés a hullámhossz függvényében

2.4.6. Szervetlen tápanyagok koncentrációja (C, N, P).

Az algáknak, szaporodásukhoz, az ideális hőmérsékleten és elegendő fényen kívül, megfelelő mennyiségű szervetlen tápanyagra is szükségük van. Ezek közül a legfontosabbak a foszfor (P) a nitrogén (N) és a szén (C), melyek elméletileg szükséges mennyiségét a 4. táblázat foglalja össze.

4. Táblázat A legfontosabb tápanyagok ajánlott mennyisége

Tápanyag	[g/g]	Moláris tömeg [g/mol]	Mol arány [mol/1 mol C]
C	0,5410	12	1,0000
N	0,0822	14	0,1300
P	0,0018	31	0,0013

(Wageningen University adatai /algae.wur.nl/ alapján saját összeállítás)

Ezek mellett vannak olyan elemek melyek kisebb, vagy akár nyomnyi mennyiségben szükségesek az algák metabolizmusához, a szerkezeti váz felépítéséhez vagy az enzimek helyes működéséhez (pl.: Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, S, Zn, Cu, Co) A szükséges tápanyagok mennyisége fajonként eltérő (Knud-Hansen 2006).

Egy a kereskedelemben kapható, az AlgaeLink N.V. cég által forgalmazott, 667 m³ térfogatú, 1 tonna biomassza szárazanyag hozamú, csöves reaktor tápanyag adatai pedig, az 5. táblázatban láthatóak:

5. Táblázat AlgaeLink N.V. cég által előírt termesztési közeg összetétele

Tápanyag	[kg/nap]	Tápanyag	[kg/nap]	Tápanyag	[kg/nap]
CO ₂	2881	Kalcium	12,125	Mangán	0,30000
Szén	786	Réz	0,070	Molibdén	0,00375
Nitrogén	81	Vas	0,725	Kálium	18,3750
Foszfor	11	Magnézium	2,875	Cink	0,36250

(AlgaeLink N.V. online prospektusa alapján saját összeállítás)

A szén legjelentősebb forrásai vizes környezetben, az oldott szervetlen szénformák (DIC): CO₂, HCO₃⁻, CO₃²⁻ (Raven, 1991). A különböző formák aránya pH függő. Amennyiben CO₂ nincs jelen megfelelő mennyiségben, bizonyos algaszervezetekben lehetséges a HCO₃⁻ hasznosítása is (Larsson and Axelsson, 1999). A szervetlen szénforrások, és kiemelten a CO₂ hasznosításáról és hatásairól a 2.4.4. fejezetben írtam bővebben.

A szervetlen szén után, a második legfontosabb a nitrogén. Az algák számára a körülményektől függően, a nitrogén a termesztő közegből több formában is elérhető. A legkedveltebb és leggyakoribb forma az ammónium (NH₄⁺), melynek felvétele a pH-ra is

hatással van. Hátránya, hogy párolgás útján könnyen csökkenhet a mennyisége, főleg magas pH mellett. Másik két formája a nitrát (NO_3^-) és az karbamid ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) (Richmond, 2004).

Bár a foszfor az algasejtekben kis mennyiségben fordul elő, szerepe kulcsfontosságú. Részt vesz a sejten belüli energiatranszferben, a nukleinsav szintézisben, és különböző sejtosztódással kapcsolatos folyamatokban (Kaplan, 1986).

2.5. A termesztés optimalizációjára használható módszerek

2.5.1. Empirikus módszerek

A mikroorganizmusok által a fizikai környezet változására adott metabolikus válaszok ismerete kulcsfontosságú a gazdaságos termesztési eljárás kidolgozásában. Állandósult állapotú kultúrák jellemzőit általában hagyományos kemosztát rendszerek vizsgálatával nyerik. Kemosztát rendszerek vizsgálatakor fokozatosan változtatják a vizsgált paramétert (hígítási arány, közegösszetétel). Minden egyes változtatás után legalább három tartózkodási időnyi idő elteltével áll be a stacioner állapot. Ez a módszer emiatt nagyon időigényes, különösen akkor, ha sok mérési pont szükséges (Barbosa, 2003).

Időigényességükön túl ezek a módszerek sokszor nagyon költségesek és előfordul, hogy a laboratóriumi eredmények ipari méretre történő alkalmazásakor, az ily módon meghatározott paraméterek nem felelnek meg a technológiai lehetőségeknek.

A problémák kiküszöbölésére léteznek különböző megoldások. A valódi mérések meghagyása mellett lehetséges ún. A-stat (acceleration-stat) módszer, ahol a paraméterek változtatása fokozatosan és egyenletesen történik. A módszer kulcsa olyan növekedési arány megválasztása, amely elegendően kicsi, ahhoz, hogy a rendszer állandósult állapotú maradjon, emellett pedig a lehető legnagyobb a mérés gyorsításának érdekében. A két ellentétes érdek közelítése érdekében elengedhetetlen valamilyen kompromisszum, a gyorsan végezhető mérés és az állandósult állapot megfelelő megközelíthetősége között (Sluis et al., 2001).

Más fajta megközelítést tesznek lehetővé a kevesebb mérést és több számítógépes kapacitást igénylő matematikai modellezéses módszerek.

2.5.2. Matematikai modellezéses módszerek

Ezek a megoldások napjainkban nagy hatékonysággal törekednek az új technológiák kezdeti tervezési szakaszának gyorsítására és költséghatékonyá tételére. A módszercsoport kulcsa az

adott folyamatot legjobban leíró matematikai egyenlet, az un. folyamat modell megtalálása vagy újonnan történő megalkotása.

Számos modell került kifejlesztésre az algaszaporodás és a térfogatra eső hozam előrejelzésére fotobioreaktorokban történő termesztés esetén. Ezekben a modellekben kvázi állandósult körülmények között elvégzett kísérletekből nyert adatokkal találkozunk melyeket utólag alkalmaztak szaporodási modellekre, hogy kinetikai paramétereket nyerjenek. Az így generált modellek jó betekintést engednek abba, miként függ a szaporodási képesség a reaktort jellemző különböző paraméterektől (*Barbosa, 2003*).

Ezek a modellek azonban csak minőségi adatokat szolgáltatnak és nem alkalmazhatóak extrapolálva más reaktortípusokra, törzsekre vagy termesztési körülményekre. Ezért minden alkalommal, mikor egy modellt eredetihez képest eltérő körülmények között (reaktortípus, törzs, termesztési körülmények) alkalmazunk, szüksége van új kísérleti adatok kimérésére. Ezért az extrapolálhatóság érdekében a jövőben szükség van az algák, a környezet különböző paramétereinek változására adott metabolikus válaszainak mélyebb ismeretére (*Barbosa, 2003*).

2.5.3. Mi is az a folyamat-szimuláció?

A folyamat-szimuláció a vegyi, fizikai, biológiai vagy egyéb technikai folyamatok és szerkezeti egységek működésének, modellen alapuló szemléltetése, egy számítógépes szoftver segítségével.

A helyes alkalmazás előfeltételei a művelet során felhasznált nyersanyagok és a keletkező termékek kémiai és fizikai tulajdonságainak alapos ismerete, illetve a megfelelő matematikai modellek ismerete, melyek segítségével lehetőség nyílik a folyamat számítógéppel történő számítására.

A szoftver feladata a tömeg- és energiamérleg felállítása, megoldása és ezek segítségével egy stabil működési pont meghatározása. A folyamat-szimuláció célja egy vizsgált folyamat optimális működési feltételeinek definiálása. Ez alapvetően egy optimalizációs probléma, melynek megoldására iterációs módszert célszerű alkalmazni.

A folyamat-szimuláció mindig olyan modelleket használ, melyek becsléseket és feltételezéseket alkalmaznak, de képesek egy tulajdonság pontos leírására, viszonylag tág hőmérséklet és nyomás határok között, melyek esetleg nem támaszthatóak alá valódi adatokkal. A modellek bizonyos határok között, interpolációra és extrapolációra is

alkalmasak, és lehetővé teszik a már ismert tulajdonságok tartományán kívül eső állapotok vizsgálatát is (*Rhodes, 1996*).

2.5.4. Folyamatleíró egyenletek a szakirodalomban

Annak ellenére, hogy az algatermesztés optimalizációja nem rendelkezik hosszú múlttal, a szakirodalom mégis bőséges. Kutatásom során az egészen nagyvonalú tanulmányoktól kezdve, az egy problémával akár egészen részletesen foglalkozó cikkekkel is találkoztam. Célom az ipari méretű termesztési folyamat leírására alkalmas egyenletek keresése és kiválogatása volt.

A legtöbb optimalizációt célzó cikk megemlíttette a folyamatleíró egyenletek alapját, a Monod által kidolgozott kinetikai egyenleteket (*Chojnacka, 2004; Haney, 1996; Sterner, 1998*). Emellett találkoztam más szakemberek, például Droop által kidolgozott modellekkel (*Lemesle, 2008*), kinetikus és dinamikus modellekkel (*Belkacemi, 2003*), illetve egy vagy egyszerre több paraméter változását vizsgáló modellekkel (*Kim, 2002; Thornton, 2010*).

A legmarkánsabb különbség a modellek között, összetettségükön túl, a leírt folyamat környezeti jellemzőiben volt. Az egyenletek, a fő termesztési irányvonalak szerint, természetes (jellemzően nyílt reaktorok) vagy intenzív (túlnyomóan zárt reaktorok) termesztési technológiára vonatkoznak. Dolgozatomban az első esetre vonatkozó egyenleteket nem vizsgálom.

Az intenzív termesztést leíró egyenletek fő befolyásoló paraméterek szerinti legmegfelelőbb gyűjteményét a Dél Floridai Egyetem egyik hallgatójának PhD dolgozatában találtam (*Jalalizadeh, 2012*).

A dolgozat a létező modelleket a következő hét, legfontosabb csoportba sorolja (6-12 táblázat):

1. Modellek a szerves szén koncentrációt figyelembe véve
2. Modellek a nitrogén koncentrációt figyelembe véve
3. Modellek a foszfor koncentrációt figyelembe véve
4. Modellek a fényintenzitást figyelembe véve
5. Modellek különböző gátló hatásokat figyelembe véve
6. Modellek több paramétert figyelembe véve
7. Modellek a hőmérsékletet figyelembe véve

6. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek az szervesetlen szén koncentrációt figyelembe véve

Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \frac{S_C}{(K_{S,C} + S_C)}$	S_C : szén koncentráció	Hsueh et al., 2009; Morais and Costa, 2007; Goldman et al., 1974; Tang et al., 2011; Novak and Brune, 1985

(Jalalizadeh, 2012)

7. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a nitrogén koncentrációt figyelembe véve

Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \frac{S_N}{(K_{S,N} + S_N)}$	μ_{\max} : maximális fajlagos szaporodási sebesség $K_{S,N}$: féltelítési állandó S_N : nitrogénkoncentráció	Aslan and Kapdan, 2006; Baldia et al., 1991; Tam and Wong, 1996
$R = R_{\max} \frac{S_N}{(K_{S,N} + S_N)}$	R_{\max} : maximális felvételi sebesség	Smith 2002;
Módosított Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \begin{cases} \mu_{\max} (S - S_{\mu}) / (K + S - S_{\mu}) & \Rightarrow S > S_{\mu} \\ 0 & \text{élt} \end{cases}$	S_{μ} : ammónium koncentráció K : féltelítési állandó	Sunda et al., 2009

(Jalalizadeh, 2012)

8. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a foszfor koncentrációt figyelembe véve

Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \frac{S_P}{(K_{S,P} + S_P)}$	S_P : foszforkoncentráció	Aslan and Kapdan, 2006
Droop modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \left(1 - \frac{K_q}{q} \right)$	K_q : a növekedéshez szükséges minimális mennyiség a limitáló szubsztrátról q : a limitáló tápanyag mennyisége a sejtben	Grover, 1991; Sommer, 2011; Lemesleand Maillere, 2008;
Módosított Droop modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \left(\frac{(1 + K_q)(Q_p - Q_{p \min})}{(Q_p - Q_{p \min}) + K_q} \right) \cdot (Q_{p \max} - Q_{p \min})$	$Q_{p \min}, Q_{p \max}, Q_p$: minimum, maximum relatív foszfor hányad K_f : dimenziómentes paraméter a görbe arányainak beállítására	Flynn, 2002

Módosított Droop modell		
<i>Modell</i>	<i>Jelrendszer</i>	<i>Hivatkozás</i>
$T = K_p \cdot \mu_{\max} \cdot Q_{\max} \cdot \frac{WP}{WP + K_m} \cdot \frac{(1 - Q_t/Q_{\min})^4}{(1 - Q_t/Q_{\min})^4 - K_q}$	T: foszfortranszport sebessége (10 ⁻⁸ μmol / (sejt·min)) K_m: féltelítési állandó Q_t: teljes foszfor-mennyiség a sejtben (10 ⁻⁸ μmol/sejt) Q_{max}: maximális sejtben megtalálható foszformennyiség (10 ⁻⁸ μmol/sejt) K_p: dimenziómentes koefficiens K_f: dimenziómentes konstans a görbe alakjának szabályozására WP: a szubsztrát foszfát koncentrációja	Yao et al., 2011

(Jalalizadeh, 2012)

9. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a fényintenzitást figyelembe véve

Monod modell		
<i>Modell</i>	<i>Jelrendszer</i>	<i>Hivatkozás</i>
$\mu = \mu_{\max} \frac{I}{(K_{S,I} + I)}$	I: fényintenzitás K_{S,I}: telítettség-fényerő	Chae and Shin, 2006; Martinez et al., 1997; Huang and Chen, 1986; Sasi et al., 2011; Chojnacka and Zielińska, 2011
Exponenciális modell		
<i>Modell</i>	<i>Jelrendszer</i>	<i>Hivatkozás</i>
$\mu = \mu_{\max} \left(1 - e^{-I/K_{S,I}}\right)$	I: fényintenzitás K_{S,I}: telítettség-fényerő	Martinez et al., 1997
Ogbonna et al., 1995		
<i>Modell</i>	<i>Jelrendszer</i>	<i>Hivatkozás</i>
$\mu = K'' \left\{ \frac{\epsilon a_1 X I_0}{XV} - I_m (1 - V_F) \right\}$	K'': arányossági konstans (kg/mol) ε: konstans a₁: fényabszorpcióra alkalmas sejt felszín effektív terület (m ²) X: sejtkoncentráció (kg/m ³) V: reaktorban levő folyadék térfogata (m ³) I₀: beeső fényintenzitás (mol/m ² ·d) I_m: fenntartási arány (mol/kg·d) V_F: megvilágított reaktortérfogat	Ogbonna et al., 1995

(Jalalizadeh, 2012)

10. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek több paramétert figyelembe véve

Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \frac{S_N}{S_N + S_{NA}} \left(\frac{S_{CO_2}}{S_{CO_2} + K_{CO_2}} \right) f_I$ $f_I = \frac{I_a}{I_s} \exp \left(1 - \frac{I_a}{K_{s,I}} \right)$	K_{NA} : konstans f_I : fényintenzitási faktor I_a : átlagos fényintenzitás	Yang, 2011
$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + K_S + S/K_I} \left(\frac{I}{I_s - I} \right) \cdot \left(1 - \frac{C_x}{C_{xm}} \right) \left(1 - \frac{C_p}{C_{pm}} \right)$	C_{pm} : Maximális termék koncentráció (mg/L) C_p : Termék koncentráció (mg/L) C_{xm} : elérhető maximális sejtkoncentráció (g/L) C_x : sejtkoncentráció (g/L)	Zhang et al., 1999
$R_{\max} = R_{\max}' \frac{S_N}{(K_{s,N} + S_N)} \frac{S_P}{(K_{s,P} + S_P)}$ $R_{\max} = \frac{\mu K}{4}$	R_{max} : maximális szaporodási arány (sejt/mL d) K : terhelhetőségi kapacitás (sejt/mL) R_{max}' : R _{max} maximális értéke N vagy P telítettség mellett (sejt/mL nap)	Xin et al., 2010

(Jalalizadeh, 2012)

11. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek különböző gátló hatásokat figyelembe véve

Andrews modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{(K_S + S + S/K_I)}$	K_I : inhibíciós együttható	Zhang et al., 1999
$\mu = \frac{A'e^{(-E/RT)} [H^+]}{[H^+] + K_{OH} + [H^+]^2 / K_H}$	[H⁺] : H ⁺ koncentráció (mol/L) A' : konstans (1/d) E : növekedést limitáló reakciók aktivációs energiája (J/mol) R : egyetemes gázállandó T : abszolút hőmérséklet (K) K_{OH} és K_H : arányossági tényező	Xin et al., 2010

(Jalalizadeh, 2012)

12. Táblázat Fellelhető kinetikai modellek a hőmérsékletet figyelembe véve

Monod modell		
Modell	Jelrendszer	Hivatkozás
$\mu = T\mu_T \frac{S}{(K_S + S)}$	μ_T : a növekedési sebesség hőmérsékletfüggését leíró koefficiens	Sterner and Grover 1998

(Jalalizadeh, 2012)

A fenti táblázatokban szereplő összefüggéseken túl, még számos egyenlet lelhető fel a szakirodalomban, melyből a szelekciót el lehet végezni. Ezek közül a modellek közül kell kiválasztani a különböző, szimulálni kívánt ipari alkalmazásokhoz – melyek a modellek megalkotási feltételeihez hasonló körülmények között zajlanak le – a megfelelő modellt, a folyamat várható paramétereinek előrejelzésére.

A szelekció után, de még az ipari alkalmazásokat megelőzően a kiválasztott egyenleteket validálni kell, azaz tanúsítani kell a megfelelőségüket, amelyet egy, a témában kompetens validáló szakértő végezhet el.

Ezután a meglévő, jellemzően kisléptékű kísérletek segítségével alkotott modellek alapján az ipari alkalmazásokhoz – ismerve azok egyedi feltételeit és műszaki tartalmát – az adott technológiai folyamatra specifikus modellek állíthatók fel. Ezek a nagyléptékű modellek használhatóak később a tervezési és üzemeltetési paraméterek meghatározására, optimalására.

3. Kísérletek, módszerek

3.1. Empirikus módszerek – laboratóriumban elvégzett kísérletek

A modellekben használt paraméterek kísérlet útján történő meghatározásához a szükséges méréseket az Envihorizont Kft. szekszárdi laboratóriumában végeztem.

A műszeres és gyorsesztes mérések akkreditált módszerekkel történtek, melyek megfelelnek az **ISO** (*International Organization for Standardization*), **EN** (*European Standard*), **DIN** (*Deutsches Institut für Normung*) szabványoknak, melyeket a **MSZT** (*Magyar Szabványügyi Testület*), a **NAT** (*Nemzeti Akkreditáló Testület*) és az **ILAC** (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) is elfogadott.

A méréseket a **GLP** (*Jó Laboratóriumi Gyakorlat*) szabályainak megfelelően végeztem el. Az időigényes volumetrikus titrálásokat (**MSZ** – *Magyar Szabvány*) helyett modern, kalibrált műszerezettséggel dolgoztam, a továbbfejlesztett analitikai szabványok szerinti, a hazai és nemzetközi akkreditációs testületek, illetve a szakma által elfogadott módszerek alapján.

Méréseim során, háromféle mintával dolgoztam, melyek összetétele a következő volt:



Minta 1

- 1 L Ioncserélt víz (Cl^- mentes)
- 10 g Gyukoró tea (szerves tápanyag)
- 5 g *Spirulina* porítva (grade 5 finomság)
- 2 g Szalakáli (NH_4HCO_3)
- 0,1 g Trisó (Na_3PO_4)

11. ábra Minta 1



Minta 2

- 1 L Csapvíz
- 10 g Szervetlen gyári tápoldat Spirulinához
- 5 g *Spirulina* porítva (grade 5 finomság)
- 2 g Szalakáli (NH_4HCO_3)
- 0,1 g Trisó (Na_3PO_4)

12. ábra Minta 2



Minta 3

- 1 L Csapvíz
- 10 g Gyukoró tea (szerves tápanyag)
- 5 g *Spirulina* porítva (grade 5 finomság)
- 2 g Szalakáli (NH_4HCO_3)
- 0,1 g Trisó (Na_3PO_4)

13. ábra Minta 3

Az ipari alkalmazások követelményrendszerét figyelembe véve, a tudományos kutatási vagy oktatási célzatú tömegkísérletektől eltérően a tápanyag (törzstenyészet bankból származó, törzsspecifikus szerves és szervetlen keverék, kiegészítve az intenzív szaporulatot meghatározó sókkal), és a kísérletek II. szakaszára beszerzett, változtatható intenzitású és fényerejű színes lámpa biztosította, hogy a tápanyaggal és fénnel kapcsolatos körülmények ne legyenek limitálók.

A mérés első fázisában, négy órán keresztül, 15 percenként mértem a mintákban, az ipari alkalmazásoknál a folyamatvezérlésre alkalmazott paramétereket: hőmérsékletet, pH-t, vezetőképességet és redox potenciált (az eredmények a függelékben találhatóak). Az oxigén koncentráció és telítettség a szerves tápanyagbőség következtében nem volt kimutatható a gázbefúvás nélküli minták esetében, így a szaporodási közeg jellemzésére az előbb felsorolt paramétereket használtam.

A pH-t és a vezetőképességet WTW multi 340i típusú műszerrel (pH szonda: vezetőképesség szonda: WTW tetracon 325) a redox potenciált pedig, WTW 315i típusú műszerrel (redox potenciálmérő szonda: WTW electrosentix OEP) mértem.

A mérés teljes időtartama alatt fehérfényű, függőleges, LED megvilágítást alkalmaztam (GU10 20 SMD LED; WW: 2800-3000K; CW: 5000K).

Négy óra elteltével a mintákban mértem a KOI, az össznitrogén (TN), az ammónium-nitrogén (NH_4^+), a foszfát-foszfor (PO_4^{3-}), a szulfát (SO_2^{2-}) és a szulfid (S^{2-}) koncentrációját.

- KOI mérése:

KOI méréséhez a mintához a NANOCOLOR Test-0-29 típusú gyorsesztesztet és két órás roncsolást alkalmaztam. Ezután spektrofotométerrel mértem.

- Össznitrogén (TN) mérése

A mintát ötszörösen hígítva NANOCOLOR Test-0-88 típusú gyorseszteszt lépéseit követve, a szükséges vegyszerek hozzáadása után egy órán át roncsoltam a mintát. Majd spektrofotométerrel mértem.

- Ammónium-nitrogén (NH_4^+) mérése:

NANOCOLOR Test-0-06 típusú gyorseszteszttel, majd spektrofotométerrel határoztam meg.

- Összfoszfor mérése (PO_4^{3-}) mérése:

A mintát NANOCOLOR Test-0-80 típusú gyorseszteszt összeállítás után, egy órán át roncsoltam a mintát, 100 fokon.

- Szulfát (SO_2^{2-}) mérése:

Szulfát mérésére spektrofotometriás vizsgálatot alkalmaztam NANOCOLOR Test-0-86 típusú gyorsteszt előkészítésével.

- Szulfid (S^{2-}) mérése:

A minta VISOCOLOR Test-5-94 szerinti előkészítése után, színváltozás nem volt tapasztalható, így spektrofotometriás mérésre nem került sor.



14. ábra Mérések fehér fény mellett



15. ábra Mérések narancsszínű fény mellett

Az első négy órás szakasz után, egy hét órás megvilágítási periódusban, a fent említett paramétereken túl a mintában mértem a sejtkoncentrációt is. Ennek mérését BTG MEX-P iszapkoncentráció és szintvizsgáló műszerrel végeztem. A hosszú időintervallum miatt a mérés már csak a fényforrás bekapcsolásakor és kikapcsolásakor történt.

A mérés második szakaszában a fényforrás módosításával végeztem az előzővel megegyező mérést. A kezdeti fehérfényű LED lámpát (14. ábra), 650 nm hullámhosszú narancssárga fényel világító fényforrásra cseréltem, amint az a 15. ábrán látható.

Szakedolgozatom tárgyához illeszkedően célom a szimulációra jellemző és abban hasznosítható paraméterek mérése volt. Az algaszaporulat minőségi vizsgálata mikroszkópos kvalitatív módszerrel történt. A költségesebb elemi összetétel, fehérje-, lipid-, vitamin-, klorofill-, karotin- és mikroelem-tartalmi vizsgálatok elvégzésére pályázati finanszírozásból lett volna lehetőség. Ez azonban jelen dolgozat leadásakor még nem járt sikerrel.

A mérések elvégzése után a szükséges kinetikai jellemzőket irodalomból vett (Danesi, 2011) egyenletek segítségével határoztam meg, a részletes számítások a következő fejezetben olvashatóak.

3.2. Matematikai modellezés a kísérletek alapján

3.2.1. Folyamatleíró matematikai egyenletek szelekciója és adaptációja

Első lépésben sorra vettem az irodalomban fellelhető matematikai modelleket.

A szelekció után munkám következő lépésként informatikus segítségét kértem az egyenletek számítógépes lefuttatásában. Az ehhez szükséges konstansok és mérőszámok meghatározására előzetes számításokat végeztem. Voltak azonban olyan paraméterek is, melyek számításához mért adataim nem voltak elegendők. Ezeket meglevő, irodalmi forrásokból, az adott tanulmány körülményeinek saját méréseimhez való hasonlóságára ügyelve kerestem ki.

A mérési és irodalmi adatok (Jalalizadeh, 2012) összegyűjtése után a számításokat a következő logika szerint hajtottam végre a paraméterváltozások szimulációjának alapjául szolgáló modell megalkotásához.

Monod KOI modellből számítható a szénre vonatkozó féltelítési állandó ($K_{S,C}$)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_C}{(K_{S,C} + S_C)} \rightarrow K_{S,C} = \frac{\mu_{\max} S_C}{\mu} - S_C$$

Monod nitrogén modellből számítható a nitrogénre vonatkozó féltelítési állandó ($K_{S,N}$)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_N}{(K_{S,N} + S_N)} \rightarrow K_{S,N} = \frac{\mu_{\max} S_N}{\mu} - S_N$$

Monod foszfor modellből számítható a foszforra vonatkozó féltelítési állandó ($K_{S,P}$)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_P}{(K_{S,P} + S_P)} \rightarrow K_{S,P} = \frac{\mu_{\max} S_P}{\mu} - S_P$$

Monod fény modellből számítható a fényre vonatkozó féltelítési állandó ($K_{S,I}$)

$$\mu = \mu_{\max} \frac{I}{(K_{S,I} + I)} \rightarrow K_{S,I} = \frac{\mu_{\max} I}{\mu} - I$$

Droop modellből számítható a foszfát-foszforra vonatkozó féltelítési állandó K_q

$$\mu = \mu_{\max} \left(1 - \frac{K_q}{q}\right) \rightarrow K_q = q - \frac{\mu q}{\mu_{\max}}$$

Andrews egyszerű modellből a limitáló szubsztrátra vonatkozó féltelítési állandó K_S

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{(K_s + S + S/K_I)} \quad \rightarrow \quad K_s = \frac{\mu_{\max} S}{\mu} - \left(S + \frac{S}{K_I} \right)$$

Andrews modellből származó féltelítési állandó (K_s) segítségével már számítható a Monod hőmérséklet modell, melyből megkapható az egyed optimális hőmérsékletére ($\pm 5^\circ\text{C}$) az egyes szubsztrátok (S) mennyisége:

$$\mu = T\mu_T \frac{S}{(K_s + S)} \quad \rightarrow \quad \underline{\underline{S = \frac{\mu K_s}{T\mu_T - \mu}}}$$

Az egyeletekben szereplő szubsztrátumok mennyiségét a *Spirulina platensis* alga elemi összetétele alapján, tömegre vetítve határoztam meg. Az elemi összetétel (Cornet, 1992):



3.2.2. Paraméterváltozások szimulációja

A fenti számítási menet eredményeit az 13. táblázatban foglaltam össze. A kapott állandók segítségével pedig vizsgáltam az algaszaporodás egyik fő jellemzője, a fajlagos szaporodási sebesség hőmérsékletfüggését. Ehhez az iparban is használatos állandó szubsztrát koncentrációt vettem alapul 5 g/l-t. A fajlagos szaporodási sebesség és a hőmérséklet kapcsolatát az 16. ábra szemlélteti. Az értékeket a méréseim hőmérsékletén ($18^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) és a *Spirulina platensis* algatörzs optimum hőmérsékletén ($30^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$) határoztam meg.

13. Táblázat A számítási menet eredményei

	Fehér fény	Narancsszínű fény
	8,19g/L	10,92g/L
S_C	3,939g	5,253g
S_H	0,542g	0,723g
S_O	2,793g	3,724g
S_N	0,781g	1,042g
S_S	0,073g	0,097g
S_P	0,061g	0,082g
I	350lux	1500lux
μ_{\max}	Soley táblázat adatai (FDT=20h) alapján: 0,1 h ⁻¹	
μ	0,071 h ⁻¹	0,076 h ⁻¹

K_C	1,609g	1,659g
K_N	0,247g	0,329g
K_P	0,025g	0,026g
K_I	142,958lux	473,684lux
K_q	0,159	0,132
K_S	1,581g/L	1,648g/L



16. ábra A fajlagos szaporodási sebesség hőmérsékletfüggése

4. Eredmények és értékelésük

4.1. *Mérési eredmények*

A mérési eredmények értékelésekor mindenekelőtt fontos leszögezni, hogy az algák szaporodását, más mikrobiológiai folyamatokhoz hasonlóan nagyon sok paraméter befolyásolja. Ezek közül a specifikusan a témához kapcsolódó és rendelkezésemre álló külső laboratórium lehetőségeinek megfelelő paraméterek mérését végeztem el. Méréseim fő célja az algaszaporodást befolyásoló tényezők vizsgálata, illetve a további számítások elvégzése és a modell szimulációs feladatok alapját adó konstansok meghatározása volt.

Az alkalmazott fényforrások jellemzőit egybevetve nem volt meglepő, hogy a háromszor nagyobb energiát leadó, szabályozott fényű, narancsszínű LED használatával az eredmények nagyobb léptékkal változtak a fehér LED megvilágítású periódushoz képest. Ez a különbség az összes mért paraméternél megfigyelhető volt. Mivel a méréseket zöldalgával végeztem, az eredmények ugrásszerű javulása annak köszönhető, hogy a bennük található klorofill zöldszínének elnyelési maximuma van a vörös tartományban, 680 nm környékén (Yun, 2003)

Az eredmények értékelésénél és feldolgozásánál figyelembe vettem a labor és a legjobb ipari eredmények elérése érdekében alkalmazható, intenzifikált fotobioreaktorok szaporodási

körülményeinek és technológiai elemeinek eltéréseit, melyeket az 14. táblázatban foglaltam össze.

14. Táblázat A laboratóriumi és ipari technológiai elemek és körülmények összehasonlítása

Technológiai elem	Körülmények	
	Labor	Intenzifikált fotobioreaktor
Keverés	kézi szakaszos	folyamatos, beállított sebesség gradienssel
Gázbefúvás	nem volt	lézerperforált diffúzoros finombuborékos redox-vezérelt szabályzás
Megvilágítás	felülről folyamatosan	több oldalról, időprogramozottan, szabályozható hullámhosszal és intenzitással
Tápközegek	előzetes adagolás	folyamatos adagolás
Harvesztálás-betakarítás	nem volt	automata eltávolítás

4.2. Számítási eredmények

Számításaimmal az algaszaporodást jellemző alap konstansokat és a szaporítást legjobban jellemző mérőszámokat igyekeztem meghatározni a *Spirulina platensis* algatörzsre. Ezek között szerepel a termelékenység, az egyes tápanyagok (nitrogén, foszfor) biomasszává alakulásának határfoka és az egységnyi, keletkező algatömeghez tartozó besugárzott és felhasznált energia mennyisége. A számításokat fehér fényel és narancssárga fényel megvilágított időszakra egyaránt elvégeztem. A felhasznált képletek egy része, irodalmi forrása brazil kutatók munkáiból származik (Danesi, 2011). Az eredmények a 15. Táblázat szerint a következőképpen alakultak.

4.2.1. Termelékenység

Az ipari algatermesztés legfontosabb jellemzője a termelékenység. A termelékenységi számítások során a megvilágítási ciklus teljes ideje alatt keletkezett sejtömeg növekedést vizsgáltam. 10.10.-i mérési napon megvilágítás teljes időtartama **7 h** volt. Ez átszámítva megközelítőleg **0,292 nap**.

Minta1:
$$P_x = \frac{X_m - X_i}{T_C} = \frac{8,19 \text{ g/L} - 5,46 \text{ g/L}}{0,292 \text{ nap}} = \underline{\underline{9,35 \text{ g/Lnap}}}$$

Minta2:
$$P_x = \frac{X_m - X_i}{T_C} = \frac{4,095 \text{ g/L} - 2,73 \text{ g/L}}{0,292 \text{ nap}} = \underline{\underline{4,67 \text{ g/Lnap}}}$$

Minta3:
$$P_x = \frac{X_m - X_i}{T_C} = \frac{5,46 \text{ g/L} - 4,095 \text{ g/L}}{0,292 \text{ nap}} = \underline{\underline{4,67 \text{ g/Lnap}}}$$

Ugyanazzal az átszámítással a 10.15-i megvilágítás ideje **6 h 30 min = 0,271 nap**

$$\text{Minta1: } P_x = \frac{X_m - X_i}{T_c} = \frac{10,92\text{mg/L} - 8,19\text{g/L}}{0,271\text{nap}} = \underline{\underline{10,07\text{g/Lnap}}}$$

$$\text{Minta2: } P_x = \frac{X_m - X_i}{T_c} = \frac{8,19\text{g/L} - 5,46\text{g/L}}{0,271\text{nap}} = \underline{\underline{10,07\text{g/Lnap}}}$$

$$\text{Minta3: } P_x = \frac{X_m - X_i}{T_c} = \frac{9,56\text{g/L} - 8,19\text{g/L}}{0,271\text{nap}} = \underline{\underline{5,06\text{g/Lnap}}}$$

A számítások elvégzése után megpróbáltam összevetni adataimat a rendelkezésre álló irodalommal. Normál autotróf termesztés esetében a termelékenység jóval a mérési eredmények alatt alakultak, még a 4g/Lnap értéket sem haladták meg (Lee, 2001; Ferreira, 2010). A mért értékeknél nagyobb hozamokat csak heterotróf módon szaporítható algafajoknál találtam (pl: *Chlorella*: 20 g/Lnap). Sajnos az alkalmazott *Spirulina platensis* fajlagos növekedési sebessége harmadára esik vissza ilyen termesztési módban (Lee, 2001).

4.2.2. Inhibíciós hatás

A csapvíz klórtartalma, mint elsődleges tényező hatásának nyomán az inhibíciós hatás alakulása a klórmentes mintára vonatkoztatott számításban a következőképpen alakult:

$$(\text{Minta3} / \text{Minta1}) \cdot 100\% = (4,67\text{g/Lnap} / 9,35\text{g/Lnap}) \cdot 100\% = 49,94\% \approx \underline{\underline{50\%}}$$

$$(\text{Minta2} / \text{Minta1}) \cdot 100\% = (4,67\text{g/Lnap} / 9,35\text{g/Lnap}) \cdot 100\% = 49,94\% \approx \underline{\underline{50\%}}$$

Feltételezve, hogy a klór az inhibíciós faktor az értékeket a klórmentes mintára vonatkoztatom. Narancsfényű megvilágítás esetén a gyári szerves tápanyagot tartalmazó mintában az adaptáció következtében megszűnt az inhibítív hatás. Ezért csak a másik csapvizet mintára számoltam inhibíciót.

$$(\text{Minta3} / \text{Minta1}) \cdot 100\% = (5,06\text{g/Lnap} / 10,07\text{g/Lnap}) \cdot 100\% = 50,25\% \approx \underline{\underline{50\%}}$$

4.2.3. Nitrogén/sejt átalakulási faktor

A számítások a mérési ciklus elején mért összes nitrogén koncentrációt vettem alapul. Narancsszínű fény esetén az értékek mindhárom mintánál kisebbek, mint fehér fényben.

A kapott eredmények a tanulmányozott cikkek eredményeivel nagy hasonlóságot mutatnak, bár a körülmények néhol eltérnek a saját mérési körülményeimtől. Carvalho et al. (2004)-es munkájában 72 $\mu\text{mol foton/m}^2\text{s}$ mellett $Y_{X/N}$ értékei 5-7 mg/mg között alakultak. Carvalho

kísérletsorozatával azt is kimutatta, $Y_{X/N}$ értéke a csökkenő nitrogén koncentrációval együtt növekszik. Ezt méréseim is alátámasztják.

10.09. mért TN = **445 mg/L**

$$\text{Minta1: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(8190\text{mg/L} - 5460\text{mg/L})1\text{L}}{445\text{mg}} = \underline{\underline{6,13\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta2: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(4095\text{mg/L} - 2730\text{mg/L})1\text{L}}{445\text{mg}} = \underline{\underline{3,07\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta3: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(5460\text{mg/L} - 4095\text{mg/L})1\text{L}}{445\text{mg}} = \underline{\underline{3,07\text{mg/mg}}}$$

10.15. reggel TN = **546 mg/L**

$$\text{Minta1: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(10920\text{mg/L} - 8190\text{mg/L})1\text{L}}{546\text{mg}} = \underline{\underline{5,00\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta2: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(8190\text{mg/L} - 5460\text{mg/L})1\text{L}}{546\text{mg}} = \underline{\underline{5,00\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta3: } Y_{X/N} = \frac{(X_m - X_i)V}{N_t} = \frac{(9560\text{mg/L} - 8190\text{mg/L})1\text{L}}{546\text{mg}} = \underline{\underline{2,51\text{mg/mg}}}$$

4.2.4. Foszfor/sejt átalakulási faktor

Bár a szakirodalom nem emelte ki, mégis fontosnak találtam a nitrogén/sejt átalakulási faktor mintájára kiszámolni hasonló értékeket a foszfor/sejt átalakulás jellemzésére. Itt is a mérési intervallum kezdetén mért értékekből kaptam a rendelkezésre álló összes foszfor (TP) mennyiségét. Mivel méréseim során csak foszfát-foszfor ($\text{PO}_4\text{-P}$) adatok álltak rendelkezésemre, ezekből egy tapasztalati szorzóval számítottam a TP értékét.

A nitrogén/sejt átalakulási faktorhoz hasonlóan itt is fordított arány figyelhető meg.

10.09. mért $\text{PO}_4\text{-P} = 21,7 \text{ mg/L} \rightarrow \text{TP} = \mathbf{65,1 \text{ mg/L}}$

$$\text{Minta1: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(8190\text{mg/L} - 5460\text{mg/L})1\text{L}}{65,1\text{mg}} = \underline{\underline{41,94\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta2: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(4095\text{mg/L} - 2730\text{mg/L})1\text{L}}{445\text{mg}} = \underline{\underline{20,97\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta3: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(5460\text{mg/L} - 4095\text{mg/L})1\text{L}}{65,1\text{mg}} = \underline{\underline{20,97\text{mg/mg}}}$$

10.15. reggel $\text{PO}_4\text{-P} = 32,9 \text{ mg/l} \rightarrow \text{TP} = \mathbf{98,7 \text{ mg/L}}$

$$\text{Minta1: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(10920\text{mg/L} - 8190\text{mg/L})1\text{L}}{98,7\text{mg}} = \underline{\underline{27,66\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta2: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(8190\text{mg/L} - 5460\text{mg/L})1\text{L}}{98,7\text{mg}} = \underline{\underline{27,66\text{mg/mg}}}$$

$$\text{Minta3: } Y_{X/P} = \frac{(X_m - X_i)V}{P_t} = \frac{(9560\text{mg/L} - 8190\text{mg/L})1\text{L}}{98,7\text{mg}} = \underline{\underline{13,88\text{mg/mg}}}$$

4.2.5. Beérkezett energia és a fajlagos energiaszükséglet

A termelékenységen túl az ipari hatékonyság második legfontosabb mérőszáma a fajlagos energiaszükséglet, hiszen később ez fogja meghatározni, hogy a termesztés gazdaságos-e vagy sem. Szembetűnő, hogy bár a narancsszínű fény esetén a megvilágítás ideje rövidebb, a besugárzott energia mégis 4-5-ször nagyobb volt.

$$100 \text{ Lux} = 4,5\mu\text{mol foton/m}^2\text{s} = 1 \text{ W/m}^2$$

$$\text{A minta felülete} = 73,89 \text{ cm}^2 = 7,389 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Fehér fény: Megvilágítási idő 10.10 **7 h = 25200 s**

$$\text{Fényerősség a felszínen} = (150\text{-}350) \text{ átlagban } \mathbf{250 \text{ lux}} = \mathbf{2,5 \text{ W/m}^2} = 11,25 \mu\text{mol foton/m}^2\text{s}$$

$$\text{Besugárzott energia} = 2,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 7,389 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 25200\text{s} = \underline{\underline{465,51\text{J}}}$$

$$\text{Klórmentes mintában} = \mathbf{350 \text{ lux}} = \mathbf{3,5 \text{ W/m}^2} = 15,75 \mu\text{mol foton/m}^2\text{s}$$

$$\text{Besugárzott energia} = 3,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 7,389 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 25200\text{s} = \underline{\underline{651,71\text{J}}}$$

Narancsszínű fény Megvilágítási idő 10.15. **6 h 30 min = 23400 s**

$$\text{Fényerősség a felszínen} = \mathbf{1500 \text{ lux}} = \mathbf{15 \text{ W/m}^2} = 67,5 \mu\text{mol foton/m}^2\text{s}$$

$$\text{Besugárzott energia} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 7,389 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 23400\text{s} = \underline{\underline{2593,54\text{J}}}$$

A beérkező energiából már számítható volt az egy gramm sejttömeg-növekedésre vetített energiaigény. Itt jól látható, hogy fehér fény esetében az értékek sokkal alacsonyabbak, mint narancsszínű fény esetén. Mindkét mérési konfigurációban megfigyelhető az inhibíció hatása, mert ezekben a mintákban az inhibícióval arányosan nagyobb a növekedéshez szükséges energia.

$$10.10. \quad \underline{\text{Minta1:}} \quad \frac{651,71\text{J}}{(8,19\text{g/L} - 5,46\text{g/L})\text{IL}} = 179,53\text{J/g}$$

$$\underline{\text{Minta2:}} \quad \frac{465,51\text{J}}{(4,095\text{g/L} - 2,73\text{g/L})\text{IL}} = 341,03\text{J/g}$$

$$\underline{\text{Minta3:}} \quad \frac{465,51\text{J}}{(5,46\text{g/L} - 4,095\text{g/L})\text{IL}} = 341,03\text{J/g}$$

$$10.15. \quad \underline{\text{Minta1:}} \quad \frac{2593,54\text{J}}{(10,92\text{g/L} - 8,19\text{g/L})\text{IL}} = 950,01\text{J/g}$$

$$\underline{\text{Minta2:}} \quad \frac{2593,54\text{J}}{(8,19\text{g/L} - 5,46\text{g/L})\text{IL}} = 950,01\text{J/g}$$

$$\underline{\text{Minta3:}} \quad \frac{2593,54\text{J}}{(9,56\text{g/L} - 8,19\text{g/L})\text{IL}} = 1893,09\text{J/g}$$

Az energiaszükségletek narancssárga fényre a Minta 1 és Minta 3 esetében ötször, míg a Minta 2 esetében háromszor nagyobbak. A Minta 2 esetében ez az inhibíciós hatás csökkenésével magyarázható.

15. Táblázat Az elvégzett számítások eredménye

Jellemző	Fehér fény			Narancsszánú fény		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Termelékenység [g/Lnap]	9,35	4,67	4,67	10,07	10,07	5,06
N-átalakulási faktor [mg/mg]	6,13	3,07	3,07	5,00	5,00	2,51
P-átalakulási faktor [mg/mg]	41,94	20,97	20,97	27,66	27,66	13,88
Beérkező energia [J]	651,71	465,51		2593		
Fajlagos energiaszükséglet [J/g]	179,53	341,03	341,03	950,0	950,0	1893,09

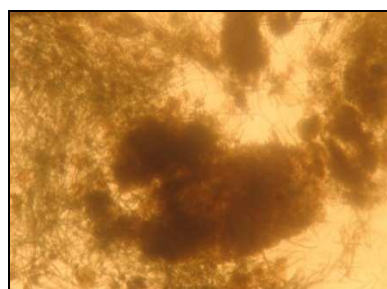
A mérés megkezdésekor feltételeztem, hogy a klórmentes, ioncserélt vizes mintában a másik két mintához képest jobbak a szaporodási körülmények, mert nincs jelen a klór, mint inhibíciós faktor. A mérések kezdeti szakaszában ezt a feltételezést a számítási eredmények is maradéktalanul alátámasztották (pl. a termelékenységben 2:1 arány volt megfigyelhető).

A fajra jellemző optimális fény-hullámhossz tartományban (680 nm) az eredmények minden mintában szignifikánsan javultak, a fény fotokatalitikus és inhibíciómérséklő hatása

következtében. Az így jelentkező megnövekedett energiaigényt azonban kompenzálják a hatásfok és tápanyag hasznosulási növekmények.

Az idő előrehaladásával és a körülmények megváltoztatásával azonban (fehér fény helyett narancsszínű) a számított eredményekben már eltűnt a különbség a csapvizese gyári tápsót illetve a klórmentes vizes szerves tápanyagot is tartalmazó minták között. Mivel a vizsgált mikroalgák rendelkeznek bizonyos fokú alkalmazkodóképességgel, a különbség csökkenése annak tudható be, hogy a Minta 2 esetében jobb volt az adaptáció, mint a Minta 3 esetében, így az inhibítív hatás mérséklődött, illetve eltűnt.

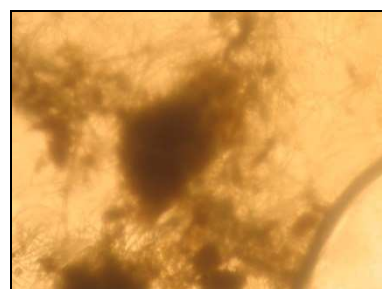
A kvalitatív mikroszkópos eredmények a Minta 1 esetében az algahatározóknak megfelelően, egészséges konfigurációt mutattak, míg a másik két inhibált mintánál, ahogy az a 17-19. ábrákon látható, szín és morfológiai eltérés volt tapasztalható még az adaptáció után is. A Minta 1 morfológiája megfelel az ipari alkalmazásoknál elvártaknak, lehetővé téve a könnyű és költségkímélő további feldolgozást. A Minta 2 nehezen vízteleníthető felépítést mutat, míg a Minta 3 inhomogenitása magas, fonalas képződmény jelentkezik.



17. ábra Morfológia: Minta 1



18. ábra Morfológia: Minta 2



19. ábra Morfológia: Minta 3

A labor és intenzifikált fotobioreaktorok körülményeinek 16. táblázatban látható összehasonlításával és a hatások különbségének vizsgálata alapján (Tózsér, 2012), a modellek segítségével számszerűsíteni lehet az üzemi termelékenységet $\text{kg/m}^3\text{nap}$ -ban a hőmérséklet függvényében, meghatározható a tápsó-anyagmérleg és a fotobiokatalitikus folyamatok energiaigényét.

16. Táblázat A laboratóriumi és ipari körülmények különbségeinek hatása

Technológiai elem	Körülmények		Hatásfok növekmény [%]	Energiaigény változás [%]
	Labor	Intenzifikált fotobioreaktor		
Keverés	kézi szakaszos	folyamatos, beállított sebesség-gradienssel	8-10	+ 10
Gázbefúvás	nem volt	lézerperforált, diffúzoros,	10-12	+ 8

		finombuborékos, redox - vezérelt szabályzás		
Megvilágítás	felülről, folyamatosan	több oldalról, időprogramozottan, szabályozható hullámhosszal és intenzitással	10-15	- 15
Tápközegek	előzetes adagolás	folyamatos adagolás	5-8	+ 3
Harvesztálás- betakarítás	nem volt	automata eltávolítás	10-15	+ 5
Hőmérséklet szabályozás	nem volt	automata fűtés - hűtés	15-20	+ 12
Globális mértékadó hatásfoknövelés intenzifikált fotobioreaktorokkal			68	
Globális mértékadó energiaigény változás				+ 23

(Tőzsér, 2012)

Az adatok alapján tehát jól látható, hogy a termelékenység szimulációhoz a labor értékeket 1,68-as faktoriall kell szorozni, míg az energiaigény esetében a szorzótényező 1,23. Számítási eredményeim az említett faktorokkal korrigálva az 17. táblázatban láthatóak. Ezekkel szorzókkal az ipari gyakorlat megalapozásához, a gazdasági számításokhoz lehet adatokat szolgáltatni. Ebben van a teljes szimulációs folyamatsor igazi haszna.

17. Táblázat Korrigált számítási eredmények

Fehér fény					
	<i>Termelékenység</i>			<i>Energiaigény</i>	
	<i>Labor</i>		<i>Ipar</i>	<i>Labor</i>	<i>Ipar</i>
	<i>[g/Lnap]</i>	<i>[kg/m³nap]</i>	<i>[kg/m³nap]</i>	<i>[J/g]</i>	<i>10⁻³ [kWh/kg]</i>
Minta 1	9,35	9,35	15,71	179,53	0,22
Minta 2	4,67	4,67	7,85	341,03	0,42
Minta 3	4,67	4,67	7,85	341,03	0,42
Narancsszínű fény					
	<i>Termelékenység</i>			<i>Energiaigény</i>	
	<i>Labor</i>		<i>Ipar</i>	<i>Labor</i>	<i>Ipar</i>
	<i>[g/Lnap]</i>	<i>[kg/m³nap]</i>	<i>[kg/m³nap]</i>	<i>[J/g]</i>	<i>10⁻³ [kWh/kg]</i>
Minta 1	10,07	10,07	16,85	950,0	1,17
Minta 2	10,07	10,07	16,85	950,0	1,17
Minta 3	5,06	5,06	8,50	1893,09	2,33

5. Következtetések és javaslatok

5.1. Következtetések

Munkám során hasznos ismeretekkel gazdagodtam a mikroalgák szaporodását, és termesztésüket meghatározó körülmények hatását vizsgálva. Fő célom, olyan eredmények prezentálása volt, amelyek később az ipari alkalmazásokban jól hasznosíthatók. Saját méréseim kivitelezése, a legjobb elérhető technika mellett, jó tapasztalatszerzési lehetőségnek bizonyult a kísérletvégzés és eredmény-feldolgozás területén.

A fenntartható fejlődés szempontjából igen értékes szakterület aktuális elméleti és gyakorlati eredményeit áttekintve és elemezve, világos képet kaptam modellek alkalmazásában rejlő, jövőben kiaknázható számos lehetőségről.

A számítások és mérések elvégzése után megpróbáltam összevetni adataimat a rendelkezésre álló irodalommal. Ekkor szembesültem azzal, hogy vélhetően a biológiai folyamatok összetettsége és a kísérleti konfiguráció különbözősége miatt, autotróf termesztés mellett a termelékenységre kapott 4,67-10,07 g/Lnap-os értékek jóval az irodalmi eredmények felett alakultak, azoknál több mint kétszer nagyobbak voltak.

Mivel a vizsgált mikroalgák rendelkeznek bizonyos fokú alkalmazkodóképességgel, a Minta 2 esetében az adaptáció következtében szűnt meg az inhibítív hatás, míg ugyanez a jelenség a Minta 3 esetében nem volt megfigyelhető. A különbség oka vélhetően a gyári tápanyag jelenléte és a fényforrás megváltoztatása volt.

Több cikkben megtalálható következtetést, miszerint a nitrogén/sejt átalakulási faktor ($Y_{X/N}$) értéke a csökkenő nitrogén koncentrációval együtt növekszik, méréseim is igazolták. Ez még kiegészíthető azzal, is hogy az eredményekre a nitrogén koncentráción túl a fényforrás energiája is hatással lehet, mivel a változás a narancsszínű fény használatakor is szembetűnő volt. A nitrogén/sejt átalakulási faktorhoz hasonlóan fordított arányosság a $Y_{X/P}$ és a foszforkoncentráció esetében is megfigyelhető.

Fehér fény esetén a beérkező energiaértékek 4-5-ször alacsonyabbak, mint narancsszínű fény esetében, és a fény hasznosulása is alacsonyabb a kisebb mértékű elnyelés miatt. Emellett az inhibíciós hatás mérséklődésével az energiaszükségletek különbsége csökkent, mert narancssárga fényre a Minta 1 és Minta 3 esetében ötször, míg a Minta 2 esetében csak háromszor volt nagyobb.

Az irodalomból és saját mérésekből származó kutatási eredmények gyakorlatba való átültetésében segítségemre volt informatikai eljárásokkal a folyamatleíró modell-szimuláció. A konkrét, ipari berendezéseknél hasznosítható termelékenységi és energiaszükségleti paraméterek meghatározása megvalósult. Eszerint termelékenységre 68%-os, energiaigényre 23%-os növekmény várható. A kapott szorzótényezőkkel számítottam ki a méréseim ipari méretben történő megvalósításával várható hozamokat és energiaszükségleteket a klórmentes inhibíció nélküli mintában, 15,71 kg/m³nap és 16,85 kg/m³nap illetve 0,22 kWh/kg és 1,17 kWh/kg.

A feldolgozási és értékelési fázis kérdései előrevetítették a további munkavégzési fő irányvonalait, melyek további hasznos lehetőségeket biztosíthatnak az ipari alkalmazásokban. Ezek kifejtése a javaslatok között olvashatóak.

5.2. *Perspektívák az ipari alkalmazáshoz*

A modellek felhasználása a tervezési, beruházási és üzemeltetési költségek (energia, tápsó, karbantartás) csökkenését, a termelékenység, kapacitás kihasználás, folyamatstabilitás javulását és további automatizálási lehetőségeket kihasználását eredményezheti a biotechnológiában algákat alkalmazó ipari folyamatoknál. A modellek segítségével lehetségessé válhat kísérleti ciklusok beállítása a zsákutcák elkerülésével, illetve fél-üzemi és üzemi berendezéseket hatékony tervezése is.

Ezeket túl, a természetben kívánt algákat forgalmazó algtörzs-bankok által biztosított adatok a modellek alapján tovább fejleszthetőek és pontosíthatóak. Az algabankok által forgalmazott algtörzseket és a hozzájuk tartozó legfontosabb jellemzőket a 18. táblázat foglalja össze

18. Táblázat Kereskedelemben kapható algtörzsek főbb technikai adatai

<i>Törzs</i>	<i>Kód</i>	<i>Cr (III) elt. [%]</i>	<i>Cr (IV) elt. [%]</i>
<i>Chlorella miniata</i> (módosított krómeltávolításra)	SLYCM27	81	100
	<i>Kód</i>	<i>Keményítő [%]</i>	
<i>Chlorella sp.</i> (magas keményítő tartalom)	SLYCH12	% 32-%41	
	<i>Kód</i>	<i>Lipid [%]</i>	<i>Duplázódási idő [nap]</i>
<i>Chlorella vulgaris</i> (Normál)	SLYCV01	4,7-16,4	0,3-2,5

	<i>Kód</i>	<i>β-karotin</i> [%]	<i>Duplázódási idő</i> [h]		
<i>Dunaliella salina</i> (magas karotintartalom)	SLYDS09	14	22		
	<i>Kód</i>	<i>EPA** / Total FA*</i> [%]	<i>Total FA*</i> [mg/g]		
<i>Phaeodactylum</i> <i>tricornutum</i> (magas EPA-tartalom)	SLYPT08	38-42	108		
	<i>Kód</i>	<i>Algaolaj</i> [%]	<i>Olajtermelés</i> [L/m ³ víz]		
<i>Pleurochrysis carterae</i> (Normál)	SLYPC01	18-20	0,2		
	<i>Kód</i>	<i>Fehérje</i> [%]	<i>Repr. hőm.</i> [°C]	<i>EPA**</i> [%]	<i>Duplázódási idő</i> [h]
<i>Spirulina platensis</i> M2	SLYSP79	72	15-39	8,2	8
	<i>Kód</i>	<i>Fehérje</i> [%]	<i>EPA**</i> [%]	<i>Duplázódási idő</i> [h]	
<i>Spirulina platensis</i> M2 (magas fehérjetartalom)	SLYSP09	68	1,8	20	

(Soley Institut alगतáblázata alapján saját összeállítás)

* FA (fatty acid) telített és telítetlen zsírsavak

** EPA (icosapentaenoic acid) eikozapentaénsav, esszenciális zsírsav

A működési körülmények ismeretében meg lehet határozni a termesztés talán legfontosabb komoly gazdasági jelentőséggel bíró jellemzőjét, a termelékenységet, melynek segítségével gazdaságossági számításokat lehet végezni a beruházásokat megelőző, megvalósíthatóságtanulmányok (feasibility study) elkészítéséhez. Ez lerövidítheti az engedélyeztetési eljárások miatt önmagában is elég hosszadalmas beruházási ciklusidőt, ami különösen előnyös lehet elsősorban a többféle algaegyedet szaporító üzemek esetében.

5.3. *Javaslatok*

A munka elvégzése során nyert tapasztalatok alapján a következő javaslatok megfogalmazását érzem fontosnak.

A jövőbeni kutatómunka hatékonyságának növelése érdekében mindenképpen szükséges a labormérések további finomítása, bővítése. Ez magában foglalhatja a vizsgálati periódus növelését, mérhető paraméterek számának gyarapítását, jellemzők értékeinek kisebb, finomabb változásokor bekövetkező következmények kellően érzékeny mérését, vagy akár több eltérő mintakörnyezet szimultán vizsgálatát. Amennyiben ezek megvalósulnak, nagy segítséget nyújthatnak a modellezés és szimuláció pontosításában és ennek köszönhetően szélesebb körű térhódításában.

Ezekon túl, bár a laborkísérletek is nagyon fontosak, szükséges *félüzemi standard berendezések kialakítása* az üzemi folyamatok pontosabb szimulációjára. Sokszor jellemző, hogy a méretnöveléssel (magasság, átmérő) a reaktor viselkedése jelentősen megváltozik (áramlások, megvilágítás, fűthetőség). Az esetleges hibák észlelése és kiküszöbölése egyrészt sokkal egyszerűbb másrészt sokkal olcsóbb, mintha felépítenék és beüzemelnék egy nagy kapacitású ipari berendezést, és a hibák csak ezután kerülnek napvilágra.

A fél-üzemi standard berendezéseknek kísérleti jelentőségükön túl nagy előnye még, hogy megkönnyítik az ipari reaktorok gyors beüzemeléséhez szükséges populáció könnyű elérését, hiszen benne élnek a törzstenyészetek. Így hozzájárulhatnak a fotobioreaktorok bedolgozási idejének lerövidítéséhez.

Ezek mellett szükséges a tudományos jellegű kísérleti *modellek és szimulációs eljárások továbbfejlesztése* az ipari folyamatok megalapozásához, a tervezés és üzemeltetés hatékonyságának növelésére. A főbb továbbfejlesztési irányok a következők:

- Sztöchiometriai egyenletekből keletkező modellek (ma még nem fellelhető a szakirodalomban)
- Az intenzifikált fotobiokatalitikus reaktorokra vonatkozó szimulációs modell elkészítése (sebesség-gradiens, közegjellemzők, fotobiotechnológiai elemek, költséghatékonyság)
- Algatörzs-specifikus modellek kifejlesztése
- Elméleti alapok továbbfejlesztése: fotobiokémia, kinetika, speciális adaptált számítástechnika

A szimulációs műszaki meghatározásokat követően elkészíthetővé válnak a *beruházási programok*, a költségek és a projektszakaszok időigényeinek meghatározásával, melyek szükségesek a megvalósítási tőkebevonáshoz.

Összefoglalás

Dolgozatomban a környezetvédelem területén sokszínűen alkalmazható algák természeti sajátosságait és felhasználási lehetőségeit tekintetem át. A főbb hasznosítási területek között említhető a környezetvédelem (szennyvíztisztítás, rekultivációs célok, CO₂ emisszió csökkentés) a biotechnológia (élelmiszerek, takarmányok, biopolimerek, kozmetika, gyógyászat) és a bioenergetika. Az irodalmi háttérre alapozva pedig méréseket is végeztem. Az eredményeket értékelve pedig összefüggést kerestem bizonyos környezeti jellemzők hatása és az algaszaporodás között modellek segítségével.

Az algák várható és már jelenleg is megfigyelhető térhódításának köszönhetően, szükség van az adott célokra alkalmazható nagy mennyiségű, lehetőleg monokultúras algabiomassza termesztésére. Mivel a jelenlegi hazai és nemzetközi gyakorlat empirikusan közelíti meg a mikroalgák szaporításának kérdéskörét, a beruházási és üzemeltetési költségek igen magasak. Az így kapott kísérletek eredményei pedig nem mindig felelnek meg a rendelkezésre álló technológiai lehetőségeknek az ipari méretekben történő alkalmazáskor. Nagyobb mennyiségek termesztésekor elsőrendű szempont a hatékonyság növelése a költségek csökkentése mellett.

Célom ezért, egy optimális folyamat-szimulációs modell kiválasztása volt (tervezési és üzemeltetési paraméterszámításhoz, megfelelő technológiai-folyamatábra elkészítéséhez). Az optimális modell segítségével a későbbiekben könnyebbé válhatnak a tervezési, üzemellenőrzési és folyamatszabályzási munkák, csökkenthetők a beruházási költségeket és növelhető folyamatos, stabil összetételű biomassza termesztésének hatékonysága.

Munkám első lépéseként a különböző algával oltott minták viselkedését vizsgáltam a minták könnyen mérhető, a folyamatirányításban használt paramétereinek mérésével (hőmérséklet, vezető képesség, redox potenciál, pH). Emellett egy-egy mérési ciklus elején és végén mértem a minták KOI, PO₄-P, TN, NH₄-N, SO₂²⁻ és S²⁻ tartalmát. Méréseim több szakaszban különböző paraméterek változtatásával történtek. Ezek alapján a modell egyenletekhez szükséges alap konstansokat (féltelítési állandók, limitáló szubsztrát mennyiségek, fajlagos és maximális szaporodási sebesség) és a termesztést jellemző mérőszámokat (termelékenység, nitrogén és foszfor átalakulási faktor, fajlagos energiaszükséglet) számításokkal határoztam meg.

Második lépésben kutatást folytatattam a szakirodalomban, melynek során az algák növekedésével kapcsolatos folyamatleíró egyenleteket kerestem. A különböző természetű befolyásoló tényezőket alapján felírt egyenletek segítségével végül a Monod hőmérséklet modell alapján számítottam a törzs-specifikus iparban alkalmazott fix szubsztrát koncentráció melletti fajlagos szaporodási sebességet a hőmérséklet függvényében.

A számítások és mérések elvégzése után megpróbáltam összevetni adataimat a rendelkezésre álló irodalommal. Ekkor szembesültem azzal, hogy vélhetően valamilyen mérési hiba léphetett fel vagy egyéb ismeretlen ok befolyásolhatta a mérést, mivel a kísérletek során autotróf természetűvel a termelékenység 4,67-10,07 g/Lnap-os értékeivel, jóval az irodalmi eredmények felett alakultak, azoknál több mint kétszer nagyobbak voltak.

Mivel a vizsgált mikroalgák rendelkeznek bizonyos fokú alkalmazkodóképességgel, a Minta 2 esetében az adaptáció következtében szűnt meg az inhibíciós hatás, míg ugyanez a jelenség a Minta 3 esetében nem volt megfigyelhető. A különbség oka vélhetően a gyári tápanyag jelenléte és a fényforrás megváltoztatása volt.

Több cikkben megtalálható következtetést, miszerint a nitrogén/sejt átalakulási faktor ($Y_{X/N}$) értéke a csökkenő nitrogén koncentrációval együtt növekszik, méréseim is igazolták. Ez még kiegészíthető azzal, is hogy az eredményekre a nitrogén koncentráción túl a fényforrás energiája is hatással lehet, mivel a változás a narancsszínű fény használatakor is szembetűnő volt. A nitrogén/sejt átalakulási faktorhoz hasonlóan fordított arányosság a $Y_{X/P}$ és a foszforkoncentráció esetében is megfigyelhető.

Fehér fény esetén a beérkező energiaértékek 4-5-ször alacsonyabbak, mint narancsszínű fényes esetében, és a fény hasznosulása is alacsonyabb a kisebb mértékű elnyelés miatt. Emellett az inhibíciós hatás mérséklődésével az energiaszükségletek különbsége csökkent, mert narancssárga fényre a Minta 1 és Minta 3 esetében ötször, míg a Minta 2 esetében csak háromszor volt nagyobb.

Az a mérések és számítások elvégzése után elkezdődhetett az irodalomból és saját mérésekből származó kutatási eredmények gyakorlatba való átültetése. Elsőként megvalósult a konkrét, ipari berendezéseknél hasznosítható termelékenységi és energiaszükségleti paraméterek meghatározása a mérések alapján. Ennek alapján a termelékenységre 68%-os energiaigényre 23% növekmény várható. A kapott szorzótényezőkkel mérési eredményeim alapján ipari

méretben hozamok $15,71 \text{ kg/m}^3\text{nap}$ illetve $16,85 \text{ kg/m}^3\text{nap}$, az energiaszükségletek $0,22 \text{ kWh/kg}$ illetve $1,17 \text{ kWh/kg}$ lesznek, a klórmentes inhibíció nélküli minta alapján.

A továbbiakban szükség van a kutatómunka hatékonyságának növelésére és érzékenyebbé tételére, annak érdekében, hogy minél pontosabb alapot nyújthassanak a modellek és szimulációs eljárások megalkotásához. Ennek érdekében szükséges lenne hosszabb idejű és több mint három mintával végzett mérésekre.

Jelen munkámban felhasznált egyszerű struktúrájú modellek (legtöbbször egy változó paraméter, vagy maximum három) miatt nagyon sok a természetet befolyásoló hatást nem tudtam figyelembe venni. Így a szűk keretek miatt igyekeztem az egyik legfontosabb tényező, a hőmérséklet fajlagos szaporodási sebességre gyakorolt hatását kiemelni. Ebben a szakirodalomnak megfelelően, én is közel lineáris összefüggést kaptam.

A többi dolgozatomban felsorolt tényező hatását komplexebb vizsgálhatósága érdekében szükségesnek látnám az alapmodellek és szimulációs eljárások tovább fejlesztését, melyek alapján végül megszülethetnének különböző beruházásokat segítő programok.

A fotobioreaktorok fejlesztésekor a legérzékenyebb kérdés a méretnövelés. Emiatt az esetlegesen hibásan méretezett nagyipari reaktorok felesleges költségeit elkerülve szükség lenne fél-üzemi standard berendezések kialakítására. Amelyekben jelen munkámban elvégzett kísérleteket is tovább lehetne vinni, pontosítani. Emellett ezek lehetővé tennék a könnyű és gyors hozzáférhetőséget a kísérletekben alkalmazott beoltó törzsekhez.

Irodalomjegyzék

Barbosa, M.J.G.V (2003) Microalgal photobioreactors: Scale-up and optimization, PhD thesis, Wageningen Univesity, ISBN: 90-5808-898-7

Barbosa M. J., Hoogakker J., Wijffels R. H., (2003) Optimization of cultivation parameters in photobioreactors for microalgae cultivation using the A-stat technique, Biomolecular Engineering

Belkacemi K., Hamoudi S. (2003) Photobioreactor Stability by Phase Plane Technique Applied to Spirulina Maxima Growth, International Journal of Chemical Reactor Engineering Vol 1 article 34 ISSN 1542-6580

Berg-Nilsen J. (2006) Production of Micro algae based products – Nordic Innovation Centre – Oslo – pp8.

Berges J. A., Varela D. E., Harrison P. J. (2002) Effects of temperature on growth rate, cell composition and nitrogen metabolism in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae) Marine Ecology Progress Series, Vancouver

Cardozo K. H. M. et al., (2007) Metabolite from Algae with Economical Impact, Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxilcology and Pharmacology

Carlsson, A. S., van Beilen, J. B., Möller, R., Clayton, D. (2007) Micro- and macro-algae: utility for industrial applications. In: Bowles, D. (ed.). Outputs from the EPOBIO: Realising the Economic Potential of Sustainable Resources – Bioproducts from Non-food Crops Project, CNAP, University of York, UK.

Carvalho J. C. M., Francisco F. R., Almeida K. A., Sato S. (2004) Cultivation of *Arthrospira* (*Spirulina*) *Platensis* (Cyanophyceaec) by Fed-batch Aaddition of Ammonium Chloride at Exponentially Increasing Feeding Rates, Journal of Applied Phycology, 40, 589-597

Charlier R. H., Chaineux M-C. P. (2009) The Healing Sea: A Sustainable Coastal Ocean Resource: Thalassotherapy, Journal of Coastal Research, West Palm Beach, Florida ISSN 0749-0208

Chojnacka K., Noworyta A. (2004) Evaluation of *Spirulina* sp. growth in photoautotrophic, heterotrophic and mixotrophic cultures, Enzyme and Microbial Technology, Volume 34, Issue 5, Pages 461–465

Cornet J.F., Dussap C.G., Cluzel P., Dubertret G. (1992) A Structured Model for Simulation of Cultures of the Cyanobacterium *Spirulina platensis* in Photobioreactors: II. Identification of Kinetic Parameters under Light and Mineral Limitations, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 40, Pp. 826-834

Danesi E. D. G., Rangel-Yagui C. O., Sato S., Monteiro de Carvalho J. C. (2011) Growth and content of *Spirulina platensis* biomass chlorophyll cultivated at different values of light intensity and temperature using different nitrogen sources, *Brazilian Journal of Microbiology* 42: 362-373 ISSN 1517-8382

Efterpi C. (2012) Macroalgae as functional food ingredients - a new area in Biotechnology, *Research Journal of Biotechnology*, Vol. 7 (3)

European Commission (2010) *Functional Foods, Studies and Reports*, Brussels

Ferreira L.S., Rodrigues M.S., Converti A., Sato S., Carvalho J.C. (2010) A new approach to ammonium sulphate feeding for fed-batch *Arthrospira (Spirulina) platensis* cultivation in tubular photobioreactor, *Biotechnology Progress*, Volume 26, Issue 5, pages 1271–1277,

Flammini A. (2011) *Algae-based Biofuels, Perspectives for developed and developing countries*, FAO workshop

Grobbelaar, J. U. (2004) Algal nutrition. In: Richmond, A. (ed.). *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell, London.

Haney J. D., Jackson G. A. (1996) Modeling phytoplankton growth rates, *Journal of Plankton Research* Vol.18 no.1 pp.63-85,

Jalalizadeh M. (2012) *Development of an Integrated Process Model for Algae Growth in a Photobioreactor*, PhD thesis, University of South Florida

Kaplan D., Richmond A. E., Dubinsky Z., Aaronson S. (1986) *Handbook of Microalgal Mass Culture*. Boca Raton: CRC, 147–198.

Kim, Nag-Jong, In Soo Suh, Byung-Ki Hur, Choul-Gyun Lee (2002) Simple Monodimensional Model for Linear Growth Rate of Photosynthetic Microorganisms in Flat-Plate Photobioreactors, *Journal of Microbiology and Biotechnology* 12 (6), 962–971

Knud-Hansen C. F., PH.D. (2006) Pond Fertilization: ecological approach and Practical application

Larsson, C., Axelsson, L., (1999) Bicarbonate uptake and bicarbonate utilization in marine macroalgae, *Eur. J. Phycol.* 34, 79–86.

Leavitt, P. R., Findlay, D. L., Hall, R. I., Smol J. P. (1999) Algal responses to dissolved organic carbon loss and pH decline during whole-lake acidification: Evidence from paleolimnology. *Limnol. Oceanogr.*, 44(3, part 2): 757–773.

Lee Y-K. (2001) Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential, *Journal of Applied Phycology* 13, 307-315

Lemesle V., Mailleret L. (2008) A Mechanistic Investigation of the Algae Growth “Droop” Model, Springer Science + Business Media B. V.

Litkei Cs. (2010) Alga fotobioreaktorok, PhD összefoglaló

Nienow, J. A. (2000) Preliminary development and evaluation of an algae-based air regeneration system, NASA, Life support & biosphere science : international journal of earth space (ISSN 1069-9422); Volume 7; 2; 203-7

Ozkurt, I. (2009) Qualifying of safflower and algae for energy. *Energy Educ Sci Technol A* 23:145–151.

Pendersen, M. F., Hensen, P. J. (2003) Effects of high pH on the growth and survival of six marine heterotrophic protists. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol. 260: 33–41.

Plaza M., Cifuentes A., Ibáñez E. (2008) In the search of new functional food ingredients from algae, Food Science and Technology, Institute of Industrial Fermentations (CSIC), Madrid

Raven, J.A., (1991) Implications of inorganic carbon utilization: ecology, evolution and geochemistry. *Can. J. Bot.* 69, 908–924.

Reed, G., Klugh A. B. (1924) Correlation between Hydrogen Ion Concentration and Biota of Granite and Limestone Pools. *Ecology*, Vol. 5, No. 3: 272-275.

Rhodes C.L., (1996) The Process Simulation Revolution: Thermophysical Property Needs and Concerns, *J.Chem.Eng.Data*, 41, 947-950,

- Richmond A. (2004) Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd., ISBN 0-632-05953-2
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P. (1998) A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report: NREL/TP-580-24190. Golden, CO.
- Sluis C., Westerink B., Dijkstal M., Castelein S., Boxtel A., Giuseppin M., Tramper J., Wijffels R. H. (2001) Estimation of steady-state culture characteristics during acceleration - stats with yeasts. *Biotechnology and Bioengineering* 75:267-275
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A. (2006) Commercial Applications of Microalgae, *Journal of Bioscience and Bioengineering* Vol. 101, No. 2, 87-96.
- Sterner R. W., Grover J. P. (1998) Algal growth in warm temperate reservoirs: kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients, *Water Research*, Volume 32, Issue 12 pp. 3539-3548
- Sweetman E. (2009) Microalgae: its applications and potential. International Aqua Feed. Perendale Publishers Ltd. UK.
- Thornton A. et al. (2010) Modeling and optimization of algae growth, Report, University of Twente
- Tózsér B. (2012) rendelkezésemre bocsátott saját kutatási anyagok, céges dokumentumok
- Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H., (2008): Photobioreactors for mass cultivation of algae, *Bioresource Technology*, Institute of Life Science and Bioengineering, Tsukuba City
- Yun Y-S., Park J.M. (2001) Attenuation of monochromatic and polychromatic lights in *Chlorella vulgaris* suspensions. *Appl Microbiol Biotechnol* 55:765-770.
- Yun Y-S., Park J.M. (2003) Kinetic Modeling of the Light-Dependent Photosynthetic Activity of the Green Microalga *Chlorella vulgaris*
- Zemplényi Z. (2010) Biodízel algákból történő előállítása és az algaolaj egyes minőségi paramétereinek analitikai vizsgálata, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, VBK

Zhao B., Zhang Y., Xiong K., Zhang Z., Hao X., Liu T. (2011) Effect of cultivation mode on microalgal growth and CO₂ fixation, Chemical Engineering Research and Design

<http://www.algae4feed.org/brief/microalgae-nutritional-composition/53> 2012.09.14.

<http://www.algae4feed.org/brief/why-microalgae-for-feeds/26> 2012.09.14.

http://www.algae.wur.nl/UK/factsonalgae/growing_algae/nutrients/ 2012-09-27

http://www.algae.wur.nl/UK/factsonalgae/growing_algae/temperature/ 2012-09-28

<http://www.oilgae.com/algae/ap/ap.html> 2012-09-27

http://www.oilgae.com/non_fuel_products/biopolymers.html 2012.09.14.

<http://www.researchalgae.com/basic/effect-of-ph-on-microalgae-growth.html> 2012-09-29

<http://www.scribd.com/doc/27152112/Photo-Bioreactor> AlgaeLink N.V. 2012-10-01

<http://www.soleybio.com/institute/whatispyramidphotobioreactor.pdf> 2012-10-20

Függelék

Mérési eredmények:

2012. 10. 09. 4 órás mérés, 2012. 10.10 és 10.15. mérés eredményei:

Minta 1

<i>Minta 1</i>						
	T	pH	vezkép	redox	O2	O2
	[°C]		[mS/cm]	[mV]	[mg/L]	[%]
0:30	18.4	7.94	3.30	-66.1		
0:45	18.5	8.00	3.25	-66.0		
1:00	18.4	7.94	3.31	-71.1		
1:15	18.4	7.94	3.35	-71.5		
1:30	18.4	7.99	2.71	-76.5		
1:45	18.6	7.99	3.39	-76.9		
2:00	18.5	8.04	3.41	-77.3		
2:15	18.6	8.03	3.42	-77.8		
2:30	18.5	8.05	3.44	-81.0		
2:45	18.5	8.11	3.44	-81.4		
3:00	18.5	8.15	3.47	-82.5		
3:15	18.5	8.14	3.46	-83.1		
3:30	18.6	8.13	3.47	-82.0		
3:45	18.6	8.11	3.42	-83.7		
4:00	18.6	8.11	3.49	-84.1		
10.okt	18.3	8.38	11.88	-111.7		
10.15 reggel	18.5	7.84	12.11	-205.2		
10.15 délután	18.9	7.90	14.70	-131.7		

Minta 2

<i>Minta 2</i>						
	T	pH	vezkép	redox	O2	O2
	[°C]		[mS/cm]	[mV]	[mg/L]	[%]
0:30	18.3	8.09	12.43	-31.7		
0:45	18.5	8.13	12.39	-46.5		
1:00	18.3	8.14	12.60	-45.3		
1:15	18.5	8.17	12.61	-44.4		
1:30	18.5	8.22	12.63	-46.6		
1:45	18.4	8.24	12.64	-45.4		

2:00	18.5	8.27	12.64	-45.5		
2:15	18.5	8.28	12.64	-52.5		
2:30	18.4	8.32	12.63	-43.6		
2:45	18.5	8.34	12.64	-49.5		
3:00	18.5	8.36	12.62	-49.1		
3:15	18.7	8.38	12.61	-50.8		
3:30	18.5	8.36	12.62	-55.6		
3:45	18.6	8.36	12.62	-51.4		
4:00	18.6	8.38	12.59	-55.2		
10.okt	18.1	8.24	12.98	-98.7		
10.15 reggel	18.7	8.37	19.42	-288.7		
10.15 délután	18.9	8.63	29.50	-271.7		

Minta 3

<i>Minta 3</i>						
	T	pH	vezkép	redox	O2	O2
	[°C]		[mS/cm]	[mV]	[mg/L]	[%]
0:30	18.7	7.74	4.34	-100.4		
0:45	18.8	7.77	4.37	-78.5		
1:00	18.7	7.75	4.41	-72.1		
1:15	18.6	7.79	4.44	-62.5		
1:30	18.5	7.83	4.48	-68.0		
1:45	18.6	7.84	4.54	-64.4		
2:00	18.4	7.94	4.52	-68.5		
2:15	18.5	7.89	4.55	-69.0		
2:30	18.5	7.91	4.57	-69.2		
2:45	18.4	7.96	5.59	-70.5		
3:00	18.6	7.95	4.60	-70.8		
3:15	18.5	7.99	4.63	-73.4		
3:30	18.6	7.99	4.64	-73.0		
3:45	18.5	7.99	4.67	-73.2		
4:00	18.6	8.02	4.67	-73.4		
10.okt	18.2	8.39	19.61	-84.7		
10.15 reggel	18.5	7.88	13.36	-191.4		
10.15 délután	18.8	7.96	15.67	-217.4		

2012. 10. 09. , 10. 10. és 10. 15. bemért egyéb paraméterek értékei

		2012.10.09	2012.10.10	2012.10.15. reggel	2012.10.15. délután
SO ₂	[mg/l]	10>	-	91	1141
NH ₄	[mg/l]	265	-	336	868
TN	[mg/l]	445	-	546	>1540
PO ₄ -P	[mg/l]	21.7	28.5	32.9	>105
KOI	[mg/l]	3630	-	2240	7224
S ₂ -	[mg/l]	0,1>	-	-	-

Mért szaporulatok

Koncentrációk:		2012.10.10		Koncentrációk:		2012.10.15	
reggel:				reggel:			
Minta1:	0,4	5,46 g/l		Minta1:	0,6	8,19	
Minta2:	0,2	2,73 g/l		Minta2:	0,4	5,46	
Minta3:	0,3	4,059 g/l		Minta3:	0,6	8,19	
délután:				délután:			
Minta1:	0,6	8,19 g/l		Minta1:	0,8	10,92	
Minta2:	0,3	4,095 g/l		Minta2:	0,6	8,19	
Minta3:	0,4	5,46 g/l		Minta3:	0,7	9,56	

Besugárzott fény jellemzői

fehér	LUX	4700	Lámpa által kibocsátott fény a tárolóedény felett kb. 1 cm-rel.
	LUX	150-350	A folyadék felszénén mért fényerősség lámpa által bevilágított terület mellett.
narancs	LUX	13500	Lámpa által kibocsátott fény a tárolóedény felett kb. 1 cm-rel.
	LUX	1500	A folyadék felszénén mért fényerősség lámpa által bevilágított terület mellett.