



PANNON EGYETEM
MÉRNÖKI KAR



Vegyésmérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskola

**ALGA BIOMASSZA KINYERÉSE
FOTO-BIOREAKTOROKBAN
TERMESZTETT MIKROALGA
SZUSZPENZIÓKBÓL**

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS

DOI: 10.18136/PE.2014.570

Készítette: **Hodai Zoltán**
okleveles vegyésmérnök,
okleveles kutató-fejlesztő szakmérnök

Témavezetők: **Rippelné Dr. Pethő Dóra**
intézeti tanszékvezető adjunktus
Dr. Horváth Géza
egyetemi docens

Pannon Egyetem
Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszék
2014

**ALGA BIOMASSZA KINYERÉSE FOTO-BIOREAKTOROKBAN
TERMESZTETT MIKRO-ALGA SZUSZPENZIÓKBÓL**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Hodai Zoltán

okleveles vegyészmérnök, okleveles kutató-fejlesztő szakmérnök

Készült a Pannon Egyetem, Vegyészmérnöki Tudományok és Anyagtudományok
Doktori Iskolájának keretében

Témavezetők: Rippelné Dr. Pethő Dóra, Dr. Horváth Géza

Elfogadásra javaslom (igen/nem)
(aláírás)

Elfogadásra javaslom (igen/nem)
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: igen /nem
.....
(aláírás)

Bíráló neve: : igen /nem
.....
(aláírás)

Bíráló neve: igen /nem
.....
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján % - ot ért el

Veszprém,
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDT elnöke

KIVONAT

A szerző a dolgozatban az ipari szennyezőanyagok kibocsátását csökkentő, Magyarországon új megoldást, technológiát mutat be, amelyet a szakirodalom algatechnológiának nevez. A technológia kritikus pontját a feldolgozási műveletek jelentik, a magas beruházási és üzemeltetési költségek és a nagy műveleti idők miatt.

A szerző az algaszuszpenziók előállításához foto-bioreaktorokat tervezett és épített. Bemutatta az alगतөmeg gyors és gazdaságos szeparálását a tápoldattól, a környezetvédelmi és gazdasági szempontok figyelembevételével. Kísérleteket végzett a besűrített biomaszta stabilitásának, tárolhatóságának növelésére.

Megállapította, hogy mind a flokkuláció, mind a membrántechnológia megengedhető energiaigényű technológiák, melyek iparilag is alkalmazhatóak. A szerző megadta az algaspecifikus flokkulálószer összetételét és minimalizálta a vegyszerigényt. A membránszűrés esetében megállapította, hogy a sűríteni kívánt algaszuszpenzió életkorától és állapotától függetlenül alkalmazható szakaszos, félfolyamatos vagy folyamatos technológia. Csökkentette a mikroszűrés energiaszükségletét, és bizonyította a visszavezetett permeátum hatékonyságát.

A szerző kísérletei során újonnan megfigyelt jelenség a CO₂ fojtás (Flow Choke with Carbon Dioxide - *FCCD*), amely megoldást jelent egy kis energiaigényű ülepitési technológia kialakításánál.

A javasolt módszerrel átlagosan hatszoros besűrítést lehet elérni (30,4 g/dm³). Az algasűrítmény hosszabb ideig tárolható káros folyamatok beindulása nélkül és alkalmas a további feldolgozásra (szárazanyag előállítás, biogáz gyártás, stb.).

ABSTRACT

The author presents a new technology in Hungary which is able to reduce the emission of industrial pollutants. This technology is referred to as algae technology in the literature. Because of the high operational costs and long operational times, the critical point of this technology is processing.

The author designed and built photo-bioreactors for the preparation of algae suspensions. He presented the quick and economical separation of the algae mass from the nutrient solution, taking environmental protection and economic aspects into consideration. He also conducted experiments in order to enhance the stability and the storage life of the concentrated biomass.

The author concluded that both flocculation and membrane technology have acceptable energy requirements for industrial application. He also described the contents of the algae-specific flocculant and minimized the amount of chemicals required. As for membrane filtration, it has been concluded that either a periodic, semi-continuous, or continuous technology can be used, irrespective of the age and the state of the algae suspension to be concentrated. The author also reduced the energy demand of microfiltration and proved the effectiveness of permeate recirculation.

A new phenomenon attested during the author's experiments was CO₂ choking (Flow Choke with Carbon Dioxide – *FCCD*) which provides a solution for the implementation of a settling technology with a low energy demand.

A six-fold concentration can be achieved with the above-recommended method (up to 30.4 g/dm³). The algae concentrate can be stored for a long time without the onset of undesirable side-processes and is suitable for further processing (e.g. preparation of dry matter, biogas production, etc.).

AUSZUG

Der Autor präsentiert in seiner Dissertation eine in Ungarn neue, die Emission der industriellen Verschmutzungsmaterialien vermindernde Lösung, Technologie, welche in der Fachliteratur als Algentechnologie genannt ist. Der kritische Punkt der Technologie bedeuten die Verarbeitungsoperationen wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten und der langen Operationszeiten.

Der Autor hat zur Herstellung der Algensuspensionen Photo-Bioreaktoren geplant und gebaut. Er hat die schnelle und wirtschaftliche Separierung der Algenmasse von der Nährlösung unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte des Umweltschutzes und der Wirtschaft vorgeführt. Er hat Versuche zur Erhöhung der Stabilität, Lagerfähigkeit der verdickten Biomasse.

Er hat festgestellt, dass sowohl die Flockung als auch die Membrantechnologie Technologien mit zulässigem Energiebedarf sind, die auch industriell anwendbar sind. Der Autor hat die Zusammensetzung des algenspezifischen Flockungsmittels angegeben und den Chemikalienbedarf minimalisiert. Im Falle des Membranfiltrierens hat er festgestellt, die periodische, halbkontinuierliche oder kontinuierliche Technologie unabhängig von dem Alter und dem Zustand der zu verdicken gewünschten Algensuspension verwendbar ist. Er hat den Energiebedarf des Mikrofiltrierens vermindert und die Effizienz des zurückgeleiteten Permeates nachgewiesen.

Während der Versuche des Autors ist eine neu beobachtete Erscheinung der CO₂ Besatz („Flow Choke with Carbon Dioxide – FCCD“), welche bei Ausgestaltung der Absetztechnologie mit kleinem Energiebedarf eine Lösung bedeutet.

Mit der empfohlenen Methode kann durchschnittlich sechsmaliges Verdicken (30,4 g/dm³) erreicht werden. Das Algenkonzentrat kann für längere Zeit ohne Einleitung schädlicher Vorgänge gelagert werden und ist zur weiteren Verarbeitung (Herstellung von Trockenmaterial, Produktion von Biogas, usw.) geeignet.

TARTALOMJEGYZÉK

ÁBRAJEGYZÉK.....	1
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....	4
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE.....	6
RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....	9
BEVEZETÉS.....	10
1. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	12
1.1. CO ₂ BEFOGÁS LEHETŐSÉGEI	12
1.2. CO ₂ ELVÁLASZTÁSA SZEPARÁCIÓS MŰVELETEKKEL	13
1.3. A CO ₂ FELHASZNÁLHATÓSÁGA.....	14
1.4. ALGÁK	16
1.4.1. <i>Algák jellemzői.....</i>	<i>16</i>
1.4.1.1. Az alga-biomassza energiatartalma.....	18
1.4.1.2. Algák fotoszintézise.....	18
1.5. A MIKROALGA KIVÁLASZTÁSA.....	19
1.6. MIKROALGÁK TERMESZTÉSE	21
1.6.1. <i>A fény termesztésre gyakorolt hatása.....</i>	<i>22</i>
1.6.2. <i>A hőmérséklet termesztésre gyakorolt hatása.....</i>	<i>23</i>
1.6.3. <i>A keverés termesztésre gyakorolt hatása.....</i>	<i>23</i>
1.6.4. <i>A gázcserre termesztésre gyakorolt hatása.....</i>	<i>23</i>
1.6.5. <i>A pH termesztésre gyakorolt hatása</i>	<i>24</i>
1.6.6. <i>A tápanyagok termesztésre gyakorolt hatása.....</i>	<i>24</i>
1.7. ALGASZUSZPENZIÓK SŰRÍTÉSI LEHETŐSÉGEI.....	26
1.7.1. <i>Szűrés (gravitációs szűrés).....</i>	<i>28</i>
1.7.2. <i>Ülepítés.....</i>	<i>30</i>
1.7.2.1. Ülepítés centrifugális erőtérben.....	33
1.7.2.1.1. Centrifugák	33
1.7.2.1.2. Hidrociklonok.....	35
1.7.2.2. Ülepítés adalék hozzáadásával	36
1.7.2.2.1. Elektroflokkuláció	39
1.7.2.3. Speciális ülepítés	40
1.7.2.3.1. Autoflokkuláció.....	40
1.7.2.3.2. Szonokémiai művelet.....	41
1.7.2.3.1. Bioflokkuláció.....	43

1.7.3.	Flotálás	43
1.7.4.	Membránműveletek	46
1.7.4.1.	A membránszűrést jellemző tényezők.....	48
1.7.4.2.	Mikroszűrés (MF).....	52
1.7.4.3.	Ultraszűrés (UF)	53
1.7.4.4.	Mikroalga szuszpenziók besűrítése membránszűréssel	54
1.8.	A MIKROALGÁK FELHASZNÁLÁSA.....	61
1.8.1.	A jövő építészete.....	61
1.8.2.	Emberi táplálék.....	62
1.8.3.	Kozmetikai ipar.....	62
1.8.4.	Mezőgazdasági hasznosítás	63
1.8.5.	Biopolimer-ipar.....	63
1.8.6.	Bioenergetika	64
2.	VIZSGÁLATI MÓDSZEREK, FELHASZNÁLT ANYAGOK	67
2.1.	VIZSGÁLT ALGAFAJOK	67
2.1.1.	<i>Chlorella vulgaris</i> beij. (0-jelű törzs)	67
2.1.2.	<i>Chlorella vulgaris</i> (17-jelű törzs).....	67
2.1.3.	<i>Scenedesmus acutus meyen</i> (31-jelű törzs).....	68
2.1.4.	<i>Scenedesmus armatus chodat</i> (59-jelű törzs).....	68
2.2.	KÉMIAI FLOKKULÁCIÓS KÍSÉRLETEK ANALITIKÁJA.....	68
2.2.1.	Abszorbancia spektrum mérése	68
2.2.2.	Szárazanyag-tartalom meghatározása	69
2.2.3.	Részecsketöltöttség mérése (PCD)	69
2.2.4.	Vezetőképesség mérés	71
2.3.	KÍSÉRLETI BERENDEZÉSEK (TERVEZÉSE ÉS KIVITELEZÉSE)	72
2.3.1.	A laboratóriumi termesztési kísérletekhez kialakított foto-bioreaktor és annak egységei 73	
2.3.1.1.	A reaktor belső keretének kialakítása.....	74
2.3.1.2.	A reaktor külső keretének kialakítása.....	75
2.3.2.	A laboratóriumi tápoldatvizsgálatokhoz és/vagy a sokkolási kísérletekhez kialakított foto-bioreaktorok	76
2.3.3.	Természetes környezetben installált foto-bioreaktorok.....	78
2.4.	KÉSZÜLÉK ÉPÍTÉSE A CO ₂ -FOJTÁS PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSÁHOZ	79
2.5.	MIKROSZŰRÉSHEZ HASZNÁLT KÉSZÜLÉK BEMUTATÁSA.....	79
2.6.	HABFLOTÁLÁSHOZ ÖSSZEÁLLÍTOTT KÍSÉRLETI BERENDEZÉS.....	82
3.	KÍSÉRLETI MUNKA ÉS EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA	83

3.1.	VÁRHATÓ CO ₂ BEFOGÁS ÉS LIPDKIHOZATAL BECSLÉSE	83
3.2.	AUTOFLOKKULÁCIÓS VIZSGÁLATOK	87
3.2.1.	<i>A szén-dioxid betáplálás megszüntetése</i>	87
3.2.2.	<i>Szén-dioxiddal történő „fojtás” (Flow Choke with Carbon Dioxide - FCCD)</i>	88
3.3.	DERÍTÉSI KÍSÉRLETEK	99
3.3.1.	<i>Lúgosítósos üleptetés</i>	99
3.3.2.	<i>Lúgosítósos üleptetés adalékkal</i>	102
3.3.3.	<i>NaOH és kationos flokkulálószer addíció</i>	102
3.3.4.	<i>NaOH, kationos flokkulálószer és Fe₂(SO₄)₃ adagolása</i>	103
3.3.5.	<i>Ülepedési sebesség növelése a pH csökkentésével</i>	105
3.4.	MEMBRÁNNAL TÖRTÉNŐ SÚRÍTÉSI KÍSÉRLETEK	107
3.4.1.	<i>A permeátum természetbe való visszaforgatása</i>	114
3.4.2.	<i>Algák tárolás közbeni életképességének vizsgálata</i>	116
3.5.	HABFLOTÁLÁSI KÍSÉRLETEK	118
3.6.	SZEPARÁCIÓS MŰVELETEK ENERGIAMÉRLEGE	121
3.6.1.	<i>Flokkulálás energiamérlege</i>	121
3.6.2.	<i>A mikroszűrés energiamérlege</i>	124
3.6.3.	<i>Flokkulálás és mikroszűrés összehasonlítása</i>	125
	ÖSSZEFOGLALÁS	128
	TÉZISEK.....	130
	THESES	132
	PUBLIKÁCIÓK.....	134
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	143
	IRODALOMJEGYZÉK	144
	FÜGGELÉK	166

Ábrajegyzék

1. ábra A CO ₂ szeparációjára használatos eljárások alkalmazhatósága a nyomásviszonyok alapján	13
2. ábra Általános szaporodási görbe	21
3. ábra <i>P-I</i> görbe jellemző adatai	22
4. ábra Alga-biomassza kinyerés általános sémája	27
5. ábra Longitudinális hullám (<i>C</i> , sűrűsödések; <i>R</i> , ritkulások)	42
6. ábra Szinuszos hullám	42
7. ábra A keresztáramú membránszűrés elvi vázlata	46
8. ábra A szakaszos membránszűrés kapcsolási vázlata	47
9. ábra Membránszűrés bemelegítő membránnal	56
10. ábra Algatechnológia műveletsora	72
11. ábra A Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszéken folyó algatechnológiai kutatások különböző területei, szakaszai	73
12. ábra Belső csőkeret	74
13. ábra A bioreaktor sematikus ábrája	75
14. ábra Külső keret	75
15. ábra Sokkolás folyamatához kialakított szerkezet	76
16. ábra Tápoldat vizsgálathoz (<i>TV</i>) kialakított szerkezet	77
17. ábra Törzsoldat vizsgáló berendezés foto-bioreaktor palackjainak kialakítása	77
18. ábra Szabadba telepített nagylaboratóriumi foto-bioreaktor (műszerezési terv)	78
19. ábra Kísérleti berendezés fojtásos kísérletek elvégzéséhez	79
20. ábra A mikroszűrő berendezés felépítése	80
21. ábra Habflotáló berendezés vázlata	82
22. ábra Az ábra felső részén a CO ₂ betáplálás megszüntetésének eredménye, az alsó részen a CO ₂ fojtás eredménye látható	88
23. ábra A szaporodási index meghatározása	90

- Ábrajegyzék -

24. ábra ABS érték időbeni változása FCCD kísérletnél	91
25. ábra Poly-DADMAC fogyásértékek FCCD kísérletnél	92
26. ábra Nyomás alatti FCCD kísérlet paramétereinek meghatározása (E1 ülepítőben).....	94
27. ábra Nyomás alatti FCCD kísérlet paramétereinek meghatározása (E2 ülepítőben).....	95
28. ábra Nyomás alatti FCCD kísérlet paramétereinek meghatározása (E3 ülepítőben).....	95
29. ábra Kísérleti eredmények 25 %-os CO ₂ -tartalmú gáz átáramoltatása esetén	96
30. ábra Kísérleti eredmények 50 %-os CO ₂ -tartalmú gáz átáramoltatása esetén	97
31. ábra Kísérleti eredmények 75 %-os CO ₂ -tartalmú gáz átáramoltatása esetén	97
32. ábra Kísérleti eredmények 100 %-os CO ₂ -tartalmú gáz átáramoltatása esetén	98
33. ábra NaOH-dal elért ülepedés „friss” szüretnél, szaporodási fázisban	99
34. ábra NaOH-dal+Fe ₂ (SO ₄) ₃ -al elért ülepedés.....	102
35. ábra NaOH-dal+kationos flokkulálószerrel elért ülepedés	103
36. ábra NaOH-dal+kationos flokkulálószerrel+Fe ₂ (SO ₄) ₃ -dal elért ülepedés	103
37. ábra Kémiai flokkulációs kísérletek eredménye	106
38. ábra Egy-egy mosási ciklus permeátum áramának vezetőképessége a mosás folyamán.....	108
39. ábra A sűrítmény átmosásának hatása a permeátum áramra	109
40. ábra Az egyes szűrési kísérletek esetében mért kiindulási szuszpenzió összes szárazanyag-tartalmára vonatkoztatott algasejt-tartalom és permeátum- vezetőképesség összefüggései.....	110
41. ábra Szűrletfluxus (permeátum fluxus) értékeinek alakulása a különböző szűrési periódusokban	111

- Ábrajegyzék -

42. ábra A sűrítmény szárazanyag-tartalmának változása a sűrítési és mosási műveletek során.....	112
43. ábra Leszűretelt szuszpenziók szárazanyag-tartalmának összetétele algasejtekre vonatkoztatva	113
44. ábra A sűrítmény és permeátum anyag tartalma a kísérlet során	114
45. ábra Permeátum visszaforgathatóságának vizsgálata	115
46. ábra Rossz kondícióban lévő algaszuszpenzió mikroszkópos vizsgálata, ahol a piros körök „idegen” organizmusok jelenlétét mutatják.....	117
47. ábra Kísérleti habflotálás lépései	118
48. ábra Habként elvett sűrítmény időbeni változása	119
49. ábra Flotálás utáni, híg szuszpenziós maradék időbeni viselkedése	120
50. ábra Vegyszer elosztatására használt laboratóriumi keverőmotor műszaki adatai.....	121
51. ábra Szeparációs kísérletek energetikai értékelő diagramja	125
52. ábra Irodalmi áttekintés során összegyűjtött szeparációs módszerek energiasajellemzői	126

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat CO ₂ ipari, technológiai alkalmazási területei	14
2. táblázat CO ₂ fontosabb, lehetséges alkalmazási területei.....	15
3. táblázat Evodus cég algasűrítésre vonatkozó adatai [199, 217].....	34
4. táblázat Felületaktív anyagok vizsgálata flotálásnál	45
5. táblázat Mikroszűrők.....	54
6. táblázat Ultraszűrők	54
7. táblázat Besűrítés különböző membránok alkalmazásával	57
8. táblázat Bilad és munkatársai (2012) által mért eredmények összefoglalása [216]	58
9. táblázat Arizónára és Magyarországra vonatkozó számítások adatainak és eredményeinek táblázatos összefoglalása.....	86
10. táblázat Algatermelékenység összehasonlítása.....	86
11. táblázat Autoflokkulációs kísérletek összehasonlítása	88
12. táblázat FCCD kísérlet adatai	89
13. táblázat RRTM metódus validálási méréseinek összefoglaló táblázata.....	93
14. táblázat A pH emelése nátrium-hidroxiddal	100
15. táblázat A pH emelése ammónium-hidroxiddal	101
16. táblázat A pH emelése + adalékanyagok hatása.....	104
17. táblázat A pH csökkentése sósavval, salétromsavval	105
18. táblázat Kationos flokkulálószerre és Fe ³⁺ ionra vonatkoztatva az optimális koncentráció intervallumok	106
19. táblázat Készülékbeállítások	107
20. táblázat A habflotálási kísérletek eredményei.....	119
21. táblázat Laboratóriumi kísérletben használt, műanyag járókerekes Aquasolar 700 típusú centrifugál szivattyú műszaki adatai	121
22. táblázat 2 dm ³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paraméterei.....	121
23. táblázat TELLARINI önfelszívó vegszerszivattyú főbb műszaki adatai	122
24. táblázat 1 m ³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paraméterei	123

- Táblázatok jegyzéke -

25. táblázat 1 m ³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paraméterei CF=14-nél.....	123
26. táblázat 280 dm ³ algaszuszpenzió MF sűrítési paraméterei.....	124
27. táblázat 280 dm ³ algaszuszpenzió MF sűrítési paraméterei, kompresszor helyett a technológiában rendelkezésre álló komprimált gáz bevezetésével....	124
28. táblázat A 14-es koncentrációs faktor esetén számolt adatok összehasonlítása	125

Jelölések jegyzéke

A	.....	membránfelület [m^2]
A_M	.....	a mikroalga sűrítéséhez szükséges felület [m^2]
A_{ref}	.....	a referencia berendezésben levő felület [m^2]
$A_{\ddot{u}}$	.....	ülepítő felülete [m^2]
$A_{681,5nm}$	.....	klorofilok abszorbancia értéke 681,5 nm-en (ABS)
a	.....	eltömődési koefficiens
b	.....	eltömődési hatványkitevő
C, c	.....	koncentráció [kg/m^3]
CF	.....	koncentrációs faktor
CIP	.....	tisztítás energiaigénye [W/m^3]
c_0	.....	komponens koncentrációja a kiindulási oldatban [kg/m^3]
c_1	.....	koncentráció a membrán betáplálási oldalán [kg/m^3]
c_2	.....	koncentráció a membrán permeátum oldalán [kg/m^3]
c_f	.....	sűrítmény, retentátum koncentrációja [kg/m^3]
c_h	.....	hangterjedés sebessége [m/s]
c_M	.....	feldolgozásra kerülő alga szuszpenzió koncentrációja [kg/m^3]
c_P	.....	komponens koncentrációja a permeátumban [kg/m^3]
c_t	.....	a titrálóanyag normalitása [eq/dm^3]
d	.....	gömb alakú részecske átmérője [m]
D_b	.....	flotáló üvegoszlop átmérője [mm]
E	.....	energiaigény [J/m^3]
E_V	.....	becsült energiaigény a permeátum térfogatra [J/m^3]
E_W	.....	becsült energiaigény száraz alगतömegre [J/kg]
F	.....	Faraday-állandó [$96485 C/eq$]
f	.....	frekvencia [Hz]
g	.....	gravitációs gyorsulás [$9,81 m/s^2$]
H	.....	hígítás
I	.....	fényintenzitás
I_k	.....	fényadaptációs paraméter
J	.....	permeátum átlagos sebessége [$m^3/m^2/h$]

- Jelölések jegyzéke -

J_M	.....	a fluxus értéke a mikroalga sűrítésnél [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$]
J_{ref}	.....	a fluxus értéke a referencia berendezésben [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$]
K_M	.....	membrán permeabilitása
L	.....	levegő térfogatárama [m^3/h]
L_B	.....	durva buborékos levegőztetés munkaiigénye [J/m^3]
L_k	.....	levegő komprimálásának munkaiigénye [J/m^3]
M	.....	flotáló üvegoszlop magassága [mm]
P	.....	fotoszintetikus aktivitás
P'	.....	teljesítményigény [W/m^3]
p_B	.....	membrán belső nyomásértéke [Pa]
PE	.....	fotoszintézis maximális, elméleti energetikai hatásfoka
PI	.....	szaporodási index
P_{in}	.....	szivattyúval történő folyadék betáplálás teljesítményszükséglete [W/m^3]
P_{ipari}	.....	ipari méretű keverő teljesítményigénye [W]
p_K	.....	membrán külső nyomásértéke [Pa]
P_p	.....	permeátum szivattyúzás teljesítményszükséglete [W/m^3]
Q	.....	a tisztított folyadékfázis térfogatárama [m^3/h]
q	.....	fajlagos töltéssűrűség [$\mu\text{eq}/\text{g}$]
r_A	.....	felületarány
$Re_{\ddot{u}}$	.....	ülepedési Reynolds-szám
R_m	.....	visszatartási tényező (membran rejection coefficient)
t	.....	idő [h]
V_0	.....	kiindulási oldat térfogata [m^3]
V	.....	térfogat [m^3]
v	.....	ülepedési sebesség [m/s]
VF	.....	térfogat sűrítési arány
V_f	.....	sűrítmény, retentátum térfogata [m^3]
V_p	.....	permeátum térfogata [m^3]
V_p	.....	szűrlet mennyiség [m^3]
V_t	.....	a felhasznált titráló oldat térfogata [cm^3]
$v_{\ddot{u}}$	.....	gyakorlati ülepedési sebesség
Y_{cf}	.....	művelet biomassa k hozatala

- Jelölések jegyzéke -

Y_{CP}	permeátum levő komponensre vonatkozó kihozatal
Y_{VP}	termékként elvett permeátum térfogatára vonatkozó kihozatal
w	részecske-töltöttség meghatározáshoz beadott minta szilárdanyag-tartalma [g]
α	fajlagos lepényellenállás [m/kg]
α'	fényhasznosítási tényező
β	fotoinhibíciós paraméter
λ	hullámhossz [nm]
τ	szűrés időtartama [h]
Δp_m	membrán két oldala közötti nyomáskülönbség (transzmembrán nyomáskülönbség)
ρ_s	részecske sűrűsége [kg/m ³]
ρ_f	közeg sűrűsége [kg/m ³]
η	közeg dinamikai viszkozitása [Pa·s]
π_1	oldat ozmózisnyomása a membrán-betáplálás oldalán
π_2	oldat ozmózisnyomása a membrán-permeátum oldalán

Rövidítések jegyzéke

<i>BP</i>	..... visszamosás (Back Pulse)
<i>CCS</i>	..... CO ₂ leválasztásán és geológiai tárolásán alapuló technológia (Carbon dioxide Capture and Storage)
<i>CTAB</i>	..... cetyl-trimetilammónium-bromid
<i>cut-off</i>	..... azt a molekulatömeget jelenti, amely súlyú molekuláknak 90 %-át a membrán visszatartja (Molecular Weight Cut-Off)
<i>DAF</i>	..... oldott levegős buborék előállítás
<i>DHA</i>	..... dokazahexaén-sav
<i>EPA</i>	..... eikozapentaén-sav
<i>EPS</i>	..... exopoliszacharidok
<i>FCCD</i>	..... CO ₂ -fojtás (Flow Choke with Carbon Dioxide)
<i>flat panel</i>	..... „táblás” (panelos) kialakítású zárt foto-bioreaktor
<i>MF</i>	..... mikroszűrés (mikroszűrési szakasz)
<i>NWP</i>	..... egyenértékűsített vízáteresztő-képesség (Normalised Water Permeability)
<i>PAR</i>	..... fotoszintetikusán aktív sugárzás, 400-700 nm tartomány közötti hullámhossz intervallum (Photosynthetic Active Radiation)
<i>PCD</i>	..... részecsketöltöttség mérő (Particle Charge Detector)
<i>P-DADMAC</i>	..... poly-diállil-dimetil-ammónium-klorid
<i>PGR-anyagok</i>	..... antimikrobiális- és növényi növekedést szabályozó alternatív hormonforrások (progeszteronreceptor)
<i>PLA</i>	..... politejsav
<i>R</i>	..... algalabor reaktor
<i>raceway-pond</i>	..... nyílt termesztő (medence) foto-bioreaktor
<i>RRTM</i>	..... relatív részecske töltöttség megoszlás
<i>SAF</i>	..... diszpergált levegős buborék előállítás
<i>SDS</i>	..... nátrium-dodecilszulfát
<i>SR</i>	..... érlelő reaktor
<i>TR</i>	..... tetőn installált reaktor
<i>TV</i>	..... tápoldat vizsgáló egység (berendezés)
<i>UF</i>	..... ultraszűrés

Bevezetés

Napjainkban a környezetvédelem az élet szinte minden területén jelen van. Az évszázadok során a természetben visszafordíthatatlan károkat okoztunk, ezért nagyon fontos, hogy a tőlünk telhetőt megtegyük környezetünk védelme érdekében. Az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb hangsúlyt kap a kibocsátott szén-dioxid mennyiségének csökkentése.

Az algatechnológia felhasználása a nemzetközi kutatási, fejlesztési tevékenység egyik jelentős területe, mivel olyan „zöld-technológia”, amely a szennyezőanyagok kibocsátásának csökkentése mellett megújuló energiaforrásként szolgál. Egyre nagyobb figyelmet kapnak az olyan technológiák, melyek a kibocsátott szennyezőanyagokat számunkra hasznos anyagokká alakítják át (közvetett, közvetlen energia [1, 2]), így csökkentve a kibocsátás mennyiségét [3, 4]. A különböző üzemi áramok füstgázainak CO₂ tartalma, valamint bizonyos ipari szennyvizek nitrogén tartalma a növények számára nélkülözhetetlen tápanyagoknak számítanak [5, 6]. Az elérhető szakirodalom tanulmányozása alapján a CO₂ ilyen célú megkötése [7], illetve hasznosítása a hazai éghajlati viszonyok mellett és ipari környezetben rendelkezésre álló szinergiák kihasználásával, jó eséllyel alkalmazható. Az ipari méretekben működő bioreaktorok megoldást jelenthetnek a CO₂ valamint a nitrogén-oxidok elnyelésére/átalakítására, mert fotoszintetikus energiaátalakítás útján használják fel a fentiekben említett vegyületeket [8 - 11].

Energiatermelés szempontjából is a fotoszintetizáló mikroszkópikus élőlények (mikroalgák) jönnek elsősorban számításba, mert viszonylag gyorsan, nagy tömegben termeszthetők (egy nap alatt megkétszereződnek), termőtalaj igénye nélkül. A folyamat végterméke, amit biomasszának hívunk, jelentős mennyiségű, kémiai kötésekben raktározott napenergiát tartalmaz [12 - 14].

A kutatási projekt elsődleges célja az előzetesen kiválasztott mikroalga speciestek CO₂ megkötésére és olajtermelő, illetve lipidtermelő képességére vonatkozó adatok meghatározása.

Az algák viszonylag magas lipidtartalmuk révén alkalmasak lehetnek üzemanyagok (üzemanyag keverő komponensek) ilyen típusú, megújuló forrásból történő előállítására [15 - 23].

Feladatom egy megvalósíthatósági tanulmány készítését követően a teljes algatechnológiai lánc kiépítése, kísérleti üzemeltetése, amelyek definiálják a pilot technológia paramétereit, amely alkalmas nagy tömeghozamú és magas lipidtartalmú tenyészetek létrehozására.

A technológia kritikus pontjait a feldolgozási műveletek jelentik. A mikroalga-szuszpenzió besűrítése és a kulcskomponensek (elsősorban lipidek) ezt követő extrakciója (valamint egyéb kinyerési technikák értékes komponensekre [24]) magas beruházási és üzemeltetési költségekkel és nagy műveleti időkkel jellemezhetők. Davis és munkatársai (2011) üzemanyag kinyerési célú nyílt és zárt alga termesztő rendszereket vizsgáltak, illetve hasonlítottak össze. Átfogó elemzésük az algatechnológia gazdasági kérdéseivel foglalkozik. Tanulmányukban 10 millió gallon algaolaj előállítását vizsgálták. Becsléseikhez Aspen Plus szoftveres szimulációkat használtak fel. Fő céljuk a lipidtartalom maximalizálása. Eredményeik alapján a mikroalga alapú biodízel mindaddig nem versenyképes a kőolajalapú üzemanyagokkal szemben, amíg a technológia kihozatala nincs az energiaminimalizálással párhuzamosan maximálva. A technológia csak úgy életképes, ha a füstgáz tisztítása mellett figyelembe vesszük a szennyvíztisztítást, és a megtermelt mikroalgából egyéb hasznos termékek értékét is. Elemzésükben hangsúlyozzák, hogy a feldolgozási módszerek, valamint azok árkalkulációi viszonylag magas bizonytalansággal terheltek [25].

Kutatásom fő célja a mikroalga-szuszpenzió feldolgozása, hogy a megtermelt, felszaporított tenyészetek minél gazdaságosabban és minél kisebb műveleti idővel szeparálhatók legyenek, hiszen az algatechnológia ezirányú felhasználásának létjogosultsága, életképessége múlik ezen a lépésen. A szeparációra irányuló műveletek, illetve technológiák optimalizálása, környezetvédelmi (vegyszerigény csökkentés) és gazdasági szempontok (energiaigény csökkentés) figyelembe vételével zajlik.

További cél a besűrített biomassa stabilitásának, tárolhatóságának növelése.

1. Irodalmi áttekintés

1.1. CO₂ befogás lehetőségei

A nagyobb cégek, olajvállalatok már régebben foglalkoznak a CO₂ kibocsátás csökkentésével, illetve a hazai CO₂ elhelyezés felszíni technológiáinak vizsgálatával.

A Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium 2008. július 1-én megjelent állásfoglalása alapján a CCS technológia (CO₂ föld alatti tárolása) magyarországi bevezetéséhez egységes, közösségi szintű szabályozásra van szükség. Környezetre gyakorolt hatásával kapcsolatban nincsenek értékelhető eredmények. Magyarország fenntartásokat fogalmaz meg a technológia teljes folyamatára. Az Eötvös Lóránd Geofizikai Intézet, a Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Lóránd Tudományegyetem közös tanulmánya szerint Magyarország kedvező adottságú a CO₂ földalatti elhelyezése szempontjából. Hazánkban deponálható CO₂ mennyiséget az **F1. függelék** tartalmazza. A tanulmány szerzői azt hangsúlyozzák, hogy szükséges a környezetvédelmi, technológiai, jogi és gazdasági kérdések pontos megválaszolása [26].

A MOL Nyrt. nyilatkozata szerint a vállalat megfelelő ismeretekkel rendelkezik a kimerült olaj és gázkutak tárolási kapacitásáról. Jelen viszonyok között a saját létesítményekben történő CO₂ leválasztásban, cseppfolyósításban és leművelt földalatti szénhidrogén telepbe sajtolásában is terveket készítenek [27].

A Kiotói egyezményben meghatározott kvóta elegendő keretet biztosítana az országunk számára, de a szén-dioxid kereskedelemről adódó változásokat és az Európa Tanács direktíváit jelenleg pontosan nem ismerjük.

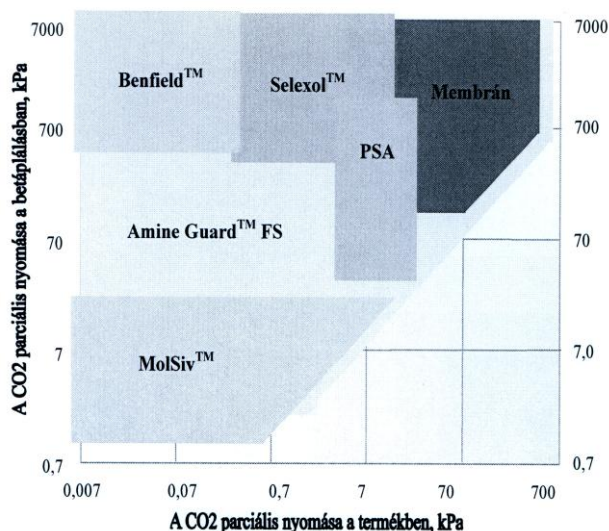
A kibocsátások és a tárolók együttese a tárolási kapacitások véges volta miatt csak átmeneti megoldást jelentenek, ráadásul a jogi háttér sem tisztázott.

1.2. CO₂ elválasztása szeparációs műveletekkel

Az utóbbi években egyrészt az ENSZ [28], másrészt az EU támogatásával két nagyméretű útmutató munka készült [29]. Ezek az összefoglaló tanulmányok 2004-2005-ig megfelelő értelmezést adnak a problémakörrel és a technikailag és/vagy gazdaságilag szóba jöhető megoldásokról. Szinte minden nagyobb olajipari cég foglalkozik a szeparáció lehetőségeivel, és értékeli azokat. Például a MOL Nyrt. munkatársai is egy jó összefoglaló értékelést készítettek [30]. A MOL Nyrt. finanszírozásával készült egy tanulmány a Pannon Egyetem Ásványolaj és Széntechnológiai Intézeti Tanszékén [31]. Ennek a munkának a 2007/3. és 2007/5. fejezetei foglalkoznak olyan kérdésekkel, amelyek részben átfedésben vannak jelen fejezettel.

A különböző, CO₂-elválasztásra szolgáló szeparációs műveleteket rendszerint az alábbi csoportosításban tárgyalják: abszorpciós műveletek, membrán műveletek, kriogén (desztillációs) műveletek, és a jelenleg különleges eljárások címén összefoglalható műveletek (szuperszonikus szeparáció, biológiai módszerek, napenergia hasznosítása).

Néhány gyakrabban használt eljárás nyomásviszonyok alapján történő alkalmazhatóságát mutatja az **1. ábra** [31]. Természetesen ez kevés, hiszen a későbbi felhasználás az elérhető tisztaságtól is függ. Ami a földalatti tárolást illeti, az előforduló szennyező komponensekre nincs korlátozás.



1. ábra A CO₂ szeparációjára használatos eljárások alkalmazhatósága a nyomásviszonyok alapján

1.3. A CO₂ felhasználhatósága

A CO₂-ot különleges tulajdonságainak köszönhetően gáz, cseppfolyós, szilárd illetve szuperkritikus formában számos helyen alkalmazzák. Az utóbbi évtizedekben mind a lehetséges felhasználási területek száma, mind a mennyiségi lehetőségek növekvő tendenciát mutatnak. A felhasználás során nem mindegy, tehát figyelembe kell venni, hogy a CO₂ honnan származik. A Linde-Gáz Magyarország Zrt. közlése szerint Répcelakon évente több mint 100.000 tonna CO₂-ot termelnek ki természetes földalatti forrásokból [32].

A **1. táblázatban** összefoglalom a CO₂ különböző ipari, technológiai alkalmazási területeit [29-31].

1. táblázat CO₂ ipari, technológiai alkalmazási területei

Alkalmazási terület	Alkalmazás
Vegyipar, gyógyszeripar	<ul style="list-style-type: none">– kémiai szintézisek alapanyaga– reakció elegyek pH és hőmérséklet szabályozása– műanyagok habosítása, extrudálása– szeparációs műveletek, extrakció, szárítás és kristályosítás szuperkritikus szén-dioxid alkalmazásával– hőérzékeny vegyületek, gyógyszerek tárolása és szállítása
Élelmiszeripar	<ul style="list-style-type: none">– üdítő- és szeszesitalok dúsítása szén-dioxiddal– hűtés, hőmérséklet szabályozás, fagyasztás– inertizálás, védőgázos csomagolás– hidegőrlés, szuperkritikus extrakciós műveletek– vágóállatok kábítása
Egészségügy és gyógyászat	<ul style="list-style-type: none">– védőgáz endoszkópos beavatkozásoknál– gázkeverékek komponense lélegeztető berendezésekhez
Fémipar (hegesztés és vágástechnika)	<ul style="list-style-type: none">– inertizálás, védőgázos hegesztés– különböző gázkeverékek komponense
Papáipar	<ul style="list-style-type: none">– pH beállítása lúgos közegek esetén– kalcium-karbonát előállítása kalcium-oxidból
Vízkezelés (szennyvízkezelés)	<ul style="list-style-type: none">– pH értékek szabályozása– ivóvíz előkezelés (lágypítás)
Elektronikai ipar	<ul style="list-style-type: none">– hűtőközegként elektromos berendezések teszteléséhez– nyomtatott áramköri lapok demaskírozása szuperkritikus CO₂ alkalmazásával
Biztonságtechnika, egyéb alkalmazások	<ul style="list-style-type: none">– inertizálás– tűzoltó berendezések oltó, illetve hajtógáza– füstkiszorítás ipari tüzelőberendezéseknél– melegházak, fóliasátrak „trágyázása” gázzal– szóróflakonok hatógáza

- Irodalmi áttekintés -

A következő évekre, évtizedekre a CO₂-ot szuperkritikus körülmények között alkalmazó eljárások fejlesztése és elterjedése is nagy lehetőségeket rejt magában [33].

A **2. táblázat**ban a CO₂-felhasználás fontosabb, lehetséges új területeit foglaltam össze.

2. táblázat CO₂ fontosabb, lehetséges alkalmazási területei

Alkalmazási terület	Alkalmazás
Extrakció	– zsírok, olajok eltávolítása élelmiszerekből [34]
Élelmiszer-, gyógyszer-, és kozmetikai iparban	– biológiailag aktív komponensek kinyerése [33]
	– antioxidánsok, peszticidek izolálása [35, 36]
	– algákból különböző vegyületek előállítása [37, 38]
Környezetvédelem	– poliklórozott aromások (<i>PCB</i>) eltávolítása [39, 40]
Szilárdanyagok előállítása, részecskeszintézis	– nano méretű, adott morfológiájú anyagok gyártása [41-43]
Katalízis	– homogén és heterogén katalitikus reakciók lejárata [44-46]

A nemzetközi irodalom és a vállalatok K+F részlegei sok szempontból vizsgálták és vizsgálják a CO₂-képződés csökkentésének lehetőségeit és az esetleges hasznosíthatóságát.

A rendelkezésemre álló ismeretek és adatok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a terület jól feltérképezett, számos technológiai megoldás hozzáférhető. Ezek ismeretében, alkalmazkodva a helyi viszonyokhoz, reális esély van a feladat megoldására. Csak olyan típusú hasznosításokkal érdemes foglalkozni, amelyek szükséglete hasonló nagyságrendbe esik, mint a rendelkezésre álló CO₂.

Jó lehetőséget jelent a CO₂ biológiai hasznosítása. Több fejlett államban folynak kísérletek és építettek kísérleti üzemeket is alga által termelt olaj előállítására. A hazai időjárási viszonyok között is jó eséllyel működtethető lenne alga-telep. A rendszer megvalósítása egy új technológiai sor kiépítését igényli.

1.4. Algák

1.4.1. Algák jellemzői

Az algák (másnéven moszatok) a legősibb élőlények közé tartoznak. Egyes alga-fajok (pl. a cianobaktériumok más néven kékalgák) már 3,5 milliárd évvel ezelőtt megjelentek, a még lakatlan (lakhatatlan) Földön, mint ennek a bolygónak az első zöld élőlényei. Földünkön 30 ezernél is több alga-fajta él [47]. Előfordulásuk szerint két nagy csoportba soroljuk őket. Vannak az édesvízi és a sósvízi vagy tengeri algák, de egyes fajták a talajban, a növényeken vagy a sziklákon honosak. Méretük szerint is két csoport ismeretes: a több méter hosszú, tengerekben élő makroalgáktól a csak mikroszkóppal látható egysejtű, mikroalgáig terjed a faj gazdagsága. Az algák még akkor sem képviselnek egységes rendszertani csoportot, ha a korábban kékalgáknak nevezett cianobaktériumokat ma már inkább a baktériumok, mint az algák között tárgyalják. Közös vonásuk, hogy fotoszintézist folytató [48], gyökerekkel és edénynyalábokkal nem rendelkező, szárra és levélre nem tagolódó, telepes testű szervezetek. Valamennyi törzsük egysejtű formákból ered, és különböző szerveződési szintre jutott el. Ilyen egysejtű algaformákból származtatható nemcsak a többségében autotróf növényvilág, hanem a színanyagokat elvesztett, heterotróf állatvilág is.

Az algák osztályozásában a fotoszintetikus pigmentek összetétele, a fotoszintézis eredményeképpen keletkezett tartalék tápanyagok előfordulása, az ostorok mikroszkópos szerkezete és a testszerveződés milyensége játssza a legfontosabb szerepet. A színanyagok alapján mindenekelőtt a *Chlorophyta*, a *Chromophyta* és a *Rhodophyta* csoportok különíthetők el, de a zöld színű *Euglenophyta*, a barna *Dinophyta*, valamint a *Cryptophyta* csoportok különleges tulajdonságaik és bizonytalan helyzetük miatt is külön tárgyalást igényelnek.

Mikroalgáknak a mikroszkópos méretű, fotoszintetizáló, jellemzően vízben élő, különböző rendszertani csoportokba tartozó organizmusokat szokták nevezni.

A biomasszán túl ezek a fotoszintetizáló szervezetek különböző értékes anyagok forrásai: pigmentek, telítetlen zsírsavak, vitaminok, élelmiszer adalékok [47] stb. lehetnek, melyek egy része esszenciális a magasabbrendű szervezetek, így az ember számára is (azaz csak külső forrásból hozzáférhető).

Előnyös tulajdonságaik sokasága megmagyarázza az algák iránt való egyre növekvő érdeklődést.

- Irodalmi áttekintés -

Az algák, mint minden élő szervezet, alapvetően fehérjékből, lipidekből és szénhidrátokból épülnek fel [49]. E három alkotórész aránya és összetétele jelentősen változhat az egyes fajokban, ezért a megfelelő törzs kiválasztása kulcslépés a gyakorlati felhasználáshoz vezető úton.

A mikroalgák (zöldalgák, kék-zöldalgák) autotróf élőlények, növekedésükhöz, szaporodásukhoz nincs szükségük szerves szubsztrátok felvételére a környezetből. Fényenergia (napfény) felhasználásával, CO₂ és szervetlen sók felvételével képesek előállítani a saját szerves molekuláikat [50]. A folyamat végterméke, amit biomasszának hívunk, jelentős mennyiségű, kémiai kötésekben raktározott napenergiát tartalmaz. A mikroalgák gyors szaporodásra és növekedésre képes mikroorganizmusok. A fényenergiát 10-50-szer nagyobb határfokkal használják fel a szárazföldi növényekhez viszonyítva [50, 51]. A mikroalgákra jellemző átlagos növekedési ciklus néhány nap, akár 24 óránál rövidebb idő alatt is megkétszerezhetik tömegüket [52]. Autotróf élőlényekként a növekedésükhöz, szaporodásukhoz CO₂-ra, energiaforrásként pedig napfényre van szükségük [50].

Nem igényelnek nagy tisztaságú CO₂-ot, természetes környezetben, a levegő 0,03-0,06 V/V% CO₂-ját használják, magasabb CO₂ tartalmú gázok (füstgázok) esetén pedig nagyobb mértékű szaporodás figyelhető meg. Bizonyos algafajok esetén például a hőerőművek füstgázai (5 - 15 V/V% CO₂) is megfelelő szénforrásként szolgálhatnak [53]: A füstgázokban levő nitrogén-oxidokat és kén-dioxidot tápanyagként hasznosítják.

Megfelelően megválasztott algafajok természetű széntüzelésű erőművek füstgázain és ipari vizeiben, zárt (foto-bioreaktorok) és nyitott (tenyésztő medencék) [54, 55] rendszerekben egyaránt [56 - 64].

Jó néhány mikroalga olajtartalma 20 - 50 m/m% között mozog (száraz tömegére vonatkoztatva). Néhány alga kémiai összetételét m/m%-ban szárazanyagra vonatkoztatva az **F2. függelék** mutatja be [65]. Egyes algafajok esetén a lipidek koncentrációja elérheti a 80 m/m%-ot is. A lipidtartalom jelentős része különböző zsírsavak glicerinnal észterezve, ami kiválóan megfelel a biodízel előállítás nyersanyagának [66, 67].

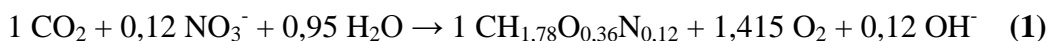
Jó lehetőségekkel kecsegtet az algákon alapuló biodízel-termelés [68], ha összehasonlítjuk az egyéb szárazföldi növényekkel évente megtermelhető olaj mennyiségét, illetve ebből előállított biodízel fajlagosakat (**F3. függelék**) [69].

A fent leírt előnyös tulajdonságok miatt (magas fotoszintetikus hatásfok, CO₂-megkötés, gyors szaporodás, illetve hulladék táp komponensek, stb.) az algákon alapuló biodízel-termelés napjainkban igen intenzíven kutatott terület.

1.4.1.1. Az alga-biomassza energiatartalma

Az egy hektáron megtermelhető alga biomassza és olaj mennyisége az adott helyre jellemző napfény energiáján túlmenően az alkalmazott algatechnológiától (alga faj, foto-bioreaktorok típus, táp komponensek, üzemviteli és egyéb paraméterek) függ.

Mivel fotoautotróf biomassza termelésről van szó, amely során a fény energiája kémiai energiává alakul, energetikai szempontból az alábbiak szerint vázolhatjuk a folyamatot (teoretikus biomassza termelés, sztöchiometrikusan meghatározott biomassza összetétel, ha CO₂-ot, vizet és nitrogénforrást használunk a termesztéshez):



Elméletileg minimálisan 14 mol foton szükséges 1 mol CO₂ beépülésére a fenti biomassza formációba. 1 mol CO₂-ból 1 mol „biomassza” keletkezik, amelynek a móltömege: 21,25 g/mol, égéshője: 547,8 kJ/mol biomassza. Alga biomassza tömegré vonatkoztatott energiatartalma:

$$\frac{547,8 \text{ kJ} / \text{mol}}{21,25 \text{ g} / \text{mol}} = 25,8 \text{ kJ} / (\text{g biomassza}) = 25,5 \text{ MJ} / (\text{kg biomassza})$$

Az alga biomassza kg-onkénti energia értékét a későbbiekben, mint a technológia felső energiakorlátját fogom tekinteni.

1.4.1.2. Algák fotoszintézise

Fotoszintézisre a napfény spektrumából csak a 400 - 700 nm közötti hullámhossz intervallum hasznosítható, ez a tartomány a teljes napfény spektrum 42,3 %-a. Ebbe a hullámhossz intervallumba eső sugárzást hívja a szakirodalom fotoszintetikusán aktív sugárzásnak (photosynthetic active radiation /PAR/) [70-72]. A fotonoknak az átlagos energiatartalma ebben a hullámhossz intervallumban: 218 kJ/(mol foton).

A fenti adatokból a **2. egyenletet** használva meghatározhatjuk a fotoszintézis maximális, elméleti energetikai hatásfokát (photosynthetic efficiency /*PE*/) [73,74].

$$PE = \frac{\text{keletkezettbiomassza (hő) energiája}}{\text{felhasznált fény energiája}} \quad (2)$$

Ez az érték a napfény teljes spektrumára: $PE_{teljes} = 9 \%$, míg a PAR tartományra: $PE_{PAR} = 21,4 \%$. Adott helyre vonatkozó, átlagos napfény-energiásűrűségi adatokból (ezek az adatok megmérhetők, megtalálhatók meteorológiai állomások adatai között, ill. interneten is elérhetők) meghatározható a maximális, elméletileg elérhető biomassza termelékenység. Ez az érték természetesen csak egy jól közelítő becslés a felső határra vonatkozóan, mivel mind a fotoszintézis átlagos hatásfoka, mind a hatásfok változása a fenti 400 - 700 nm közötti hullámhossz intervallumban algafaj függő.

1.5. A mikroalga kiválasztása

A megfelelő mikroalga-törzs kiválasztása a technológia optimális működése szempontjából kulcsfontosságú. A kiválasztás során a végtermék minősége az alapvető szempontok egyike. Például, az alga masszából kinyert lipidek legyenek alkalmasak biodízel előállítására.

Ezen túlmenően, a szakirodalom javaslatai alapján, az alábbi szempontokat is célszerű még figyelembe venni [75]: olajtartalom, a füstgáz, ill. a nagy CO₂-koncentráció hatása, termelékenység (növekedési sebesség, biomassza koncentráció), feldolgozhatóság, környezettűrés (extrém körülményeket is elvisel), fertőzés veszély, optimális hőmérséklet és *pH*-tartomány, tápoldat-összetétel, tápkomponensek minősége és mennyisége, stb.

Az olajtartalom csak hozzávetőlegesen jellemző az adott algára, általában a termesztés körülményeitől függően viszonylag széles intervallumban változhat. Az olajtartalom mellett a termelékenységre vonatkozó fajlagos adatok is értékes (tájékoztató jellegű) információt jelentenek a megfelelő törzs(ek) kiválasztásához.

A szakirodalom feldolgozásával összegyűjthetjük, illetve meghatározhatjuk mind az alga tömegre (biomassza), mind az olaj tömegre (lipidek) vonatkozó fajlagos termelékenység értékeket.

- Irodalmi áttekintés -

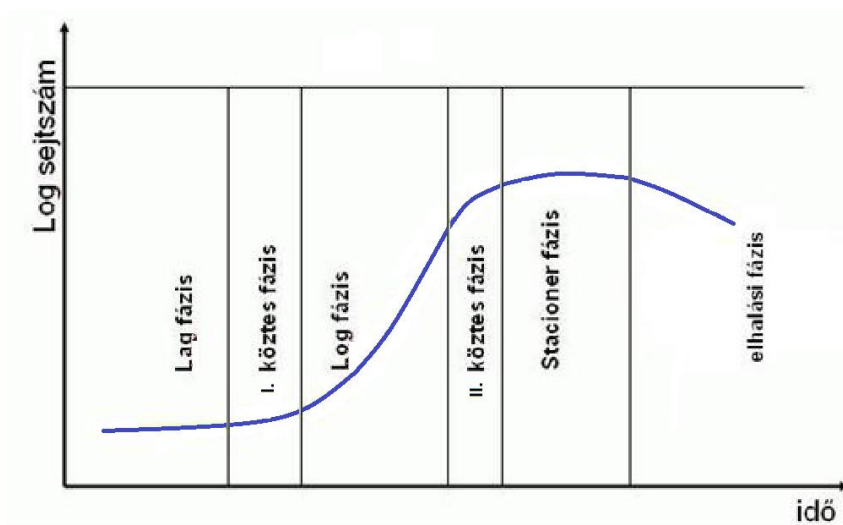
Az adatok elemzéséhez, feldolgozásához, vagy a legígéretesebb algafajok kiválasztásához mindenképpen figyelembe kell vennünk, hogy ezek az értékek természetesen csak a publikációban közölt termesztési körülmények között jellemzőek az adott alga törzsre. Abban az esetben, ha szakirodalmi közleményekből származó adatok alapján választunk algát a további vizsgálatainkhoz, megbízhatóan csak az adott közleményben is megadott forrásból szerezhethetjük be ugyanazt az algát, ugyanolyan tisztaságban. Egy ilyen gyűjteményt mutat be az **F4. függelék** [52, 69, 75-77].

A gyűjteményből jól látszik, hogy a lipid-tartalom változásán túlmenően a termelékenységre vonatkozó fajlagos értékek is igen széles tartományban (ami olykor akár egy nagyságrend is lehet) változnak a termesztési körülményektől függően. Ez egyben azt is mutatja, hogy fontos a megfelelő alगतörzs kiválasztása, de ugyanilyen fontos a megfelelő termesztési körülmények meghatározása és ezek biztosítása a termelés folyamán.

Füstgázok CO₂-megkötésére (nem túl nagy SO_x, NO_x koncentrációk mellett) az **F5. függelékben** szereplő algák tűnnek ígéretesnek [77]. Egyéb források is viszonylag nagyszámú (akár 20 - 30 féle) alगतörzs előzetes tesztelését ajánlják, majd az eredmények alapján kiválasztott néhány legígéretesebb törzs részletes vizsgálatát javasolják [78].

1.6. Mikroalgák termesztése

Az algák sikeres termesztéséhez megfelelő (az alga törzstől függő) körülményeket kell biztosítani. Az algák termesztésekor, ha az eltelt idő függvényében ábrázoljuk a sejtszám logaritmusát (a felszaporodott sejtek számát vagy a szuszpenzió koncentrációját) a szaporodási görbét kapjuk (**2. ábra**). Sejtszám korrelál a 681,5 nm-en mért abszorbancia értékkel, amely a klorofill-csúcs számszerű értéke (ehhez algafajonként algakoncentrációt tudunk rendelni). A görbe megmutatja, hogy meddig szaporodik az adott algafaj és mekkora intenzitással.



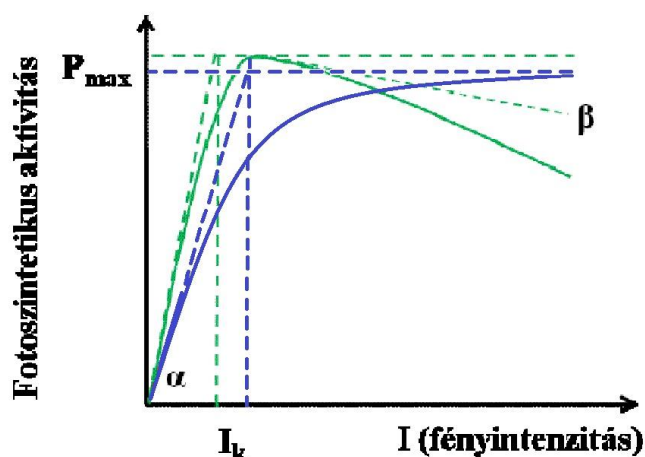
2. ábra Általános szaporodási görbe

A **2. ábrán** egy általános szaporodási görbe látható, amit az alábbi fázisokra oszthatunk. Lag fázis: Ha sejteket az egyik táptalajból egy másikba oltunk át, a sejtszám az első néhány órában nem változik, ekkor adaptálódnak organizmusaink a környezetükhöz. Log fázis: A lag fázis végére az adaptálódott sejtek szaporodásnak indulnak, és a sejtszám megtöbbszöröződik, a növekedés exponenciálissá válik. II. köztes fázis: A növekedés gyengül az elfogyó szénforrás, nitrogénforrás vagy a felhalmozódó az anyagcserében termelődő toxikus anyagok miatt. Elhalási fázis: Erre a fázisra a biomassza energiatartalékának elfogyása és a sejtek elhalása jellemző.

A szaporodási görbe segítségével lehet jellemezni egy adott termesztési időszakot, ill. algafajt, valamint optimalizálni a reaktorok működését, hogy olyan koncentrációértékek között dolgozhasson, ahol a legintenzívebb a szaporodás (legmeredekebb a görbe).

1.6.1. A fény termelésre gyakorolt hatása

Mivel az alga a fény energiáját használja az élettevékenységének a fenntartására, a fényt kulcs-paraméterként is említi a szakirodalom [79-83]. Nagyon kis fényintenzitás mellett az alga kultúra növekedése, szaporodása nulla, ezt „kompenzációs pont”-ként ismeri a szakma [84]. A fényintenzitás növelésével először a fotoszintézis is növekszik egészen a maximális növekedési sebesség eléréséig (ez a szaturációs pont), ezután az intenzitás további növelése a szaporodási sebességet nem növeli, hanem káros fotooxidációs folyamatokat indít el [85-91]. Ez esetben sérülnek az algák fény-receptorai, csökken a fotoszintézis sebessége és a szaporodási sebesség is, ez a fotoinhibíció tartománya [92, 93]. A fotoszintézis és fényintenzitás viszonyát az úgynevezett $P-I$ (Photosynthesis - Irradiance) görbék szemléltetik a legjobban (3. ábra).



3. ábra $P-I$ görbe jellemző adatai, ahol a zöld vonalak: fénygátolt fotoszintézis, kék vonalak: fényzsaturált fotoszintézis, P_{max} - maximális fotoszintézis, I_k - fényadaptációs paraméter, α - fényhasznosítási tényező, β - fotoinhibíciós paraméter

A legtöbb alga a teljes napsugárzás 20 %-ánál már eléri a szaturációs pontot [94], így a felületen vékony rétegében lévő algák az inhibíciós tartományba kerülnek, míg a mélyen lévő sejtek nem kapnak elég fényt, ez korlátozza a szaporodásukat [95-99]. Ezért előnyös nem túl nagy sűrűségű alga-szuspenzió vékony rétegben történő termelése és a megfelelő intenzitású keveredés. Az alkalmazott fény intenzitása a szaporodási sebesség mellett a lipidek felhalmozását is befolyásolja [100, 101].

1.6.2. A hőmérséklet termesztésre gyakorolt hatása

Az algák növekedési sebessége a hőmérséklet növelésével általában exponenciálisan nő egy bizonyos értékig, majd ezután csökken [102]. A hőmérséklet és a hőmérséklet-ingadozás kontrollja különösen a szabadban lévő kultúráknál okozhat nehézséget. Míg az alacsonyabb hőmérséklettartományban (- 20 – 18 °C) általában nem pusztulnak el az algák, addig az optimális hőmérséklet tartomány (az általunk vizsgált algafajok esetében ~18-25 °C) fölötti értékek élettanilag veszélyesek.

Termelékenység szempontjából a sötét fázisban előnyös az alacsonyabb hőmérséklet (~18 °C), így kisebb lesz a biomassza-veszteség [103-105]. A lipidtartalom szempontjából optimális hőmérséklettartomány felett általában rohamosan csökken a lipidtartalom is, ennek lehetséges okaként a lipid szintézisben szerepet játszó enzimek részleges inaktíválódását tartják [106, 107].

1.6.3. A keverés termesztésre gyakorolt hatása

A keverés célja a homogén alga-szuszpenzió előállítása és fenntartása. Ilyen körülmények között minden sejt azonos mértékben kap fényt és tápanyagot, továbbá csökken a sejteknek a felületen történő megtapadása [108, 109].

1.6.4. A gázcsere termesztésre gyakorolt hatása

Gázcsereinek nevezzük azt a műveletet, melynek során a reaktorba juttatunk egy gázt vagy gázkeveréket (CO₂ vagy CO₂-tartalmú gázkeverék), és a bejutó áram kihajtja a reaktorban lévő, felszaporodás következtében kialakult gázkeveréket (O₂-tartalmú gázkeverék).

Mivel az alga tömegének átlagosan 45 - 50 m/m%-a szén, nagy mennyiségű CO₂-ot kell bejuttatni a reakcióterbe, ha ez levegőből történik, általában a CO₂ lesz a limitáló komponens. Füstgázok, valamint CO₂-dal dúsított levegő esetén viszont nagy a CO₂ veszteség [110]. Nyitott rendszerekben körülbelül 20 %, míg zárt bioreaktorokban, fermentorokban jó esetben is csak 40 - 50 % a CO₂ hasznosulása. Zárt rendszerekben viszont az O₂ koncentráció értéke magas (fotoszintetikus felszaporodás közben ez dúsul a rendszerben), károsíthatja a sejteket, gátolhatja a felszaporodás folyamatát [111].

1.6.5. A *pH* termesztésre gyakorolt hatása

A legtöbb mikroalga törzs esetében a környezeti tényezőket tekintve megfigyelhető egy optimális tartomány. A *pH* esetében az optimum általában semlegeshez közeli tartományba ($pH=6-8$) tehető. A *pH* tolerancia fajoként eltérő lehet. Léteznek savas környezetet (*Chlorococcum littorale*) és lúgos környezetet (*Spirulina platensis*) jobban toleráló fajok [112]. Ezek természetes élőhelye is nagyban eltér egymástól. Korai megfigyelések írták le, hogy egymástól nem messze található mészkő alapközetű tavakban ($pH=7,6-9,2$) és gránit alapközetű tavakban ($pH = 6,2-6,8$) gyökeresen eltérő volt a fellelhető algák faji összetétele [113].

Kísérletek bizonyítják, hogy a *pH* csökkentésekor, ($pH = 5,0-6,5$) az algák aktivitása nő [114]. Ebből kiindulva következtették ki, hogy fordított esetben ($pH = 9,5$) az aktivitás csökken, amit *pH* toleráns fajokkal bizonyítottak [115].

A termesztő közeg *pH* értéke több tényezőtől függ [116]: CO_2-HCO_3 puffer rendszer kapacitásától, algák által felhasznált nitrogénforrás formájától (ha a szükséges nitrogén ammónium formájában érhető el, a *pH* csökkeni fog a termesztő közegbe leadott protonok miatt, ha az algák a nitrogént csak nitrát formájában tudják felvenni, a *pH* növekedni fog. Az így kialakuló magas *pH* hozzájárul a vízben levő ammónium párolgás útján történő csökkenéséhez.

1.6.6. A tápanyagok termesztésre gyakorolt hatása

A tenyészközegnek tartalmaznia kell azokat a szervesetlen komponenseket, amelyeket az alga sejt is tartalmaz: makroelemek (nitrogén, foszfor, ált. 16N:1P arányban, mikroelemek (kelatizált vas, magnézium, cink, kobalt, mangán, szelén, nikkel stb). [49, 117]. Nitrogén forrásként általában alkáli-fém (kálium, nátrium) nitrátot, karbamidot, ammónium-karbonátot, hidrogén-karbonátot, esetleg ammónium-nitrátot alkalmaznak. Az ammónia jelenléte a tápoldatban a koncentrációjától, a hőmérséklettől, a *pH* értékétől függően akár káros, sőt mérgező is lehet több algafaj számára. Ezen túlmenően a nitrogén-forrás minősége, koncentrációja alapvetően meghatározhatja mind a szaporodási görbék lefutását, mind a lipid tartalom alakulását [88, 91].

Castrillo és munkatársai (2013) megállapították, hogy az újrahasznosított közegből (termesztésből) származó algák sokkal több lipidet tartalmaznak, mint a friss közegből származók [105].

- Irodalmi áttekintés -

Ezek az algák bio-üzemanyag előállítására alkalmasabbak lehetnek a magasabb lipidtartalmuk következtében. A felfedezés különös jelentőséggel bír azokon a területeken, ahol a friss vízben hiányt szenvednek és jobb szoláris besugárzással rendelkeznek.

A kapcsolódó szakirodalomban nagyon sokféle tápoldat receptúra ismert (makro és mikroelemek különböző változatait alkalmazzák, különböző koncentrációkban). Ezek azonban nem nagy tömegű, sűrű algaszuszpenzió előállítására optimáltak (biológiai kutatólaborok fejlesztették ki őket, populációfenttartási céllal). Minden ismert algafajra több típusú tápoldat-receptúrát ajánlanak a különböző biológiai laboratóriumok. A receptúrák *pH* értékeit levegővel, illetve adott CO₂ koncentrációjú gázeleggyel, vagy tiszta CO₂-dal egyensúlyban írják elő úgy, hogy az adott algafaj számára kedvező legyen. A *pH* függvényében többnyire mind a szaporodási görbének, mind a lipid-tartalomnak maximuma van [93]. Az algák termesztése, szaporítása során azonban ez a kezdeti, kedvező *pH* érték eltolódik a tápkomponensek koncentrációinak, arányainak változása miatt. Minél nagyobb az alga koncentrációjának növekedése a tenyészközegben, annál markánsabb ez a változás.

Az algák termesztésére gyakran és általánosan használható tenyészközeg a BG-11 nevű tápoldat [118,119]. Összetétele az **F6. függelék**ben látható. A kész oldatot CO₂-dal telítve a tenyészközeg *pH* értéke 7,4.

Az algák nagy tömegben történő előállításához, nagy „koncentrációjú” algaszuszpenziók eléréséhez az algasejt elemi összetételén alapuló makro- és mikroelem koncentrációkat javasolnak Ramkumar és munkatársai [94]. A *Chlorella vulgaris* algasejt elemi összetétele (**F7. függelék**) alapján meghatározható egy adott tenyészközeg esetén a makro- és mikro-elemek által elérhető „alga-tömeg” kapacitás [49].

1.7. Algaszuszpenziók sűrítési lehetőségei

Az algaszuszpenziókat a későbbi feldolgozási lépések miatt szükséges besűríteni. A termékként elvett algaszuszpenzió feldolgozása, az alga-biomassza kinyerése és sűrítése az egyik legproblematisabb területe az energetikai célú algabázisú technológiáknak [194-196]. Az alkalmazott műveletek költsége a teljes alga-biomassza termelési költségének a 20-50 %-át is kiteheti, sőt, nyílt rendszerű termesztéstechnológia esetén a beruházási költségnek akár a 90 %-át is elérheti az alga kinyerésére szolgáló berendezések ára a hígabb szuszpenziók kezelése miatt [197].

A felhasználás, ill. feldolgozás függvényében vagy szárazanyag-kinyerés a cél (például a szerves extrakciós feldolgozásnál), vagy 20-30 g/dm³-es sűrítés (a biogázgyártásra történő felhasználás esetében).

A kutatómunka alapvető célja a biomassza besűrítésére és kinyerésére alkalmazható, folyamatos termesztő-technológia mellett is üzemeltethető, költség- és energia-hatékony eljárás kialakítása és technológiai paramétereinek becslése.

Munkám során az alábbiakkal foglalkoztam:

- algák ülepedési sebességének növelése a hatékony elválasztás érdekében,
- elválasztás után visszamaradt termesztő közeg újrahasznosíthatóságának vizsgálata,
- alkalmazható műveletek fajlagos anyag és energiaigénye, technológiai paramétereinek becslése.

A szeparációs módszer nagyban függ a termesztett alga jellemzőitől. A főbb módszerek a következők: tisztán mechanikai műveletek (szűrés, centrifugálás, ülepítés), adalékkal segített mechanikai műveletek (flokkuláció, derítés), membrán műveletek (mikroszűrés, ultraszűrés), egyéb műveletek (szonokémiai művelet, elektroflokkuláció, flotálás).

Kísérleti üzemek esetében a kombinált szeparációs technológiát (flokkuláció és mikroszűrés együttes alkalmazása) részesítik előnyben [126], üzemi méreteknél pedig a centrifugálást preferálják, aminek oka, hogy a szeparáció viszonylag könnyen hozzáférhető berendezések használatával kivitelezhető [126].

- Irodalmi áttekintés -

Bár az előző technológiák hozzáférhetőek, a magas energia- és költségzsükséglet mellett, környezetterhelést is jelentenek (flokulálásnál az adalékvegyyszer megjelenése az output áramban, centrifugálásnál biomassa-vesztés, ami a permeátumban jelenik meg, esetlegesen egyéb kísérő organizmusokkal).

A feldolgozásra kerülő mikroalga szuszpenziók fontosabb jellemzői:

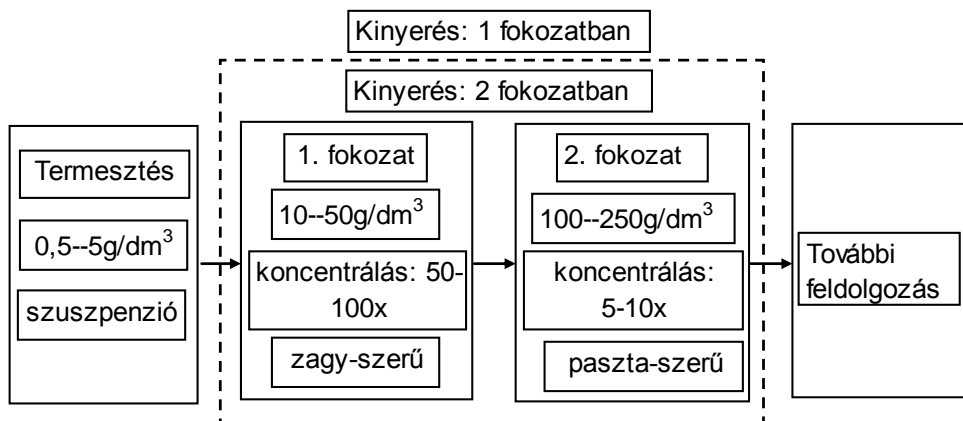
Híg vizes oldatok:

- általában 0,2-0,5 g alga/dm³ termeszto közeg (nyitott rendszerek),
- 1-5 g alga/dm³ termeszto közeg (zárt rendszerek).

Stabil szuszpenziók:

- tipikus méretük: 2-20- μ m,
- elektromos, általában negatív, felületi töltéssel rendelkeznek a termesztes körülményei között,
- sűrűségük a termeszto közeg sűrűségéhez közeli érték,
- mozgásra képesek.

Egységnyi tömegű alga kinyeréséhez nagy szuszpenzió-térfogatokat kell feldolgozni viszonylag rövid idő alatt (a szakirodalmi ajánlások alapján lehetőleg egy napon belül). Ezt általában két lépésben, két különböző művelet alkalmazásával célszerű elvégezni (4. ábra).



4. ábra Alga-biomassa kinyerés általános sémája

A mikroalga szuszpenzió fizikai tulajdonságai (kondíciója) is változnak a koncentrációval: 10-20 g alga/dm³ értékig tejszerű, 50-100 g alga/dm³-nél krémszerű és 150-200 g alga/dm³-nél sajtszerű. A szuszpenzió 70 g alga/dm³ koncentráció érték felett már nem-newtoni folyadékként viselkedik, 150-200 g alga/dm³ koncentráció-tartományban pedig már nem folyadék. A biomassa mozgásakor ezeket a sajátságokat is mindenképpen figyelembe kell venni. Ezen túlmenően a választott megoldások befolyásolhatják mind a következő műveleteket, mind az alga felhasználását.

A szakirodalom szerint mikroalgák tömegtermesztése esetén még nincs, minden körülmények között bizonyítottan, általánosan használatos módszer, különösen energetikai célú biomassa hasznosítás esetén [198].

1.7.1. Szűrés (gravitációs szűrés)

A szűrés az a fizikai művelet, melynek során a diszperziós közeg valamilyen porózus rétegen nyomáskülönbség (mint hajtóerő) hatására áthalad, miközben a diszperz rész (mikroalgasejtek) a rétegen/rétegben megkötődik.

A szűrés abban az esetben indokolt, ha a folyadékvesztés nem engedhető meg, vagy a lebegő szilárd szemcsék rosszul ülepednek, illetve a szilárd fázist minimális nedvességtartalmú üledék alakjában kívánjuk elválasztani.

A szűrőkészülékek kiválasztásánál az alábbi tényezőket kell figyelembe venni:

- A szűrendő zagy pontos összetétele, fázisok száma (folyadék-szilárd, több mint 2 alkotó, esetleg különleges esetek)?
- Melyik az értékes termék: a szilárd vagy a folyékony?
- Folyamatos vagy szakaszos szűrést kell-e végezni?
- Kívánt szűrési teljesítmény: mennyiség zagyban kifejezve (m³/h), mennyiség szilárd anyagban kifejezve (t/h), mennyi szilárd anyagot tartalmazhat a folyadék (kg/m³ vagy %), kell-e mosni, ha igen mivel és milyen hőmérsékleten?
- Folyamatos szűrésnél: mennyi a napi, heti folyamatos munkaidő, mennyi időközönként lehet a berendezést leállítani a szűrőközeg tisztításának céljából?
- Szakaszos szűrésnél: mennyi az egy sarzsban leszűrendő mennyiség, lehet-e a sarzsokat kisebb részekre osztani, mennyi idő alatt kell a sarzs szűrését befejezni?

- Irodalmi áttekintés -

Fenyeget-e a szűrési idő alatt a szarzs bomlásának vagy kémiai változásának, a kinyerendő anyagban jelentkező veszteség veszélyének lehetősége, hány szarzsot kell 24 óránként szűrni?

- Különleges követelmények a szűrlettel szemben?
- A feladott anyag jellemzése: fajsúly, szilárd anyag tartalom, van-e koncentrációingadozás, hőmérséklete (minimum, maximum), nyomása (minimum, maximum). Az anyag ülepedési tulajdonságai (lassan vagy gyorsan ülepszik), csapadékképzésre hajlamos-e az anyag, szűrhetősége (jól, nehezen, közepesen) van-e szűrési segédanyag (ha igen, ennek a tulajdonságai, pl. esetleg habképződésre hajlamos-e, vagy habzástgátló), az anyag mérgező, esetleg gőzei mérgezőek, robbanásveszélyes, éghető, vagy bármely egyéb különleges tulajdonsága van-e?
- Szilárd anyag jellemzése: fajsúlya, kémiai analízise, szemcseanalízise, szemcseeloszlása, a szemcseméretnek meg kell-e maradnia (igen, nem), szemcseforma (szálas, lemezes, amorf, stb.), szemcsekeményesség?
- Folyadék: viszkozitása, kémiai összetétele, *pH*-értéke?
- A gép megkívánt kivitele: vezérlése (automatikus, félautomatikus, kézi) egyéb megjegyzések pl. a meghajtásra vagy az elektromos hálózatra vonatkozóan?
- Szerkezeti anyagra vonatkozó megjegyzések?
- Milyen segédberendezések állnak rendelkezésre: (szivattyúk, stb.) vagy ezeket is a készülékkel együtt kell megtervezni?

A Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszékén működő algatechnológia felépítése miatt szakaszos berendezés megválasztása, vizsgálata az indokolt. Szem előtt kell tartanunk azonban, hogy a későbbi, üzemi technológiát célozva félfolyamatosan, folyamatosan üzemeltethető szeparációs berendezés alkalmazása lesz megfelelő. Meg kell jegyezni ugyanakkor, hogy folyamatos szűrő berendezés tervezése esetén mindig kell a szűrő elé tervezni egy puffertartályt, ahova szakaszosan betároljuk a szétválasztandó algaszuszpenziót, majd innen továbbítjuk a szűrő felé folyamatosan. Ez azonban további műveleti egységek tervezését jelenti, hiszen nem csak tárolótartályra van szükségünk, hanem a hozzá kapcsolódó zagy szivattyúkra, keverőkre, és ezek összességében tovább bonyolítják a technológiánkat, és ebből egyenesen következik, hogy az üzemeltetési és a beruházási költségek is megnőnek.

Leite és munkatársai (2013) az algaszuszpenziók szeparációs lehetőségeinek vizsgálatát tanulmányozták, az algatechnológia teljes műveletsora mellett. Vizsgálták a centrifugálás, flokkulálás, szűrés és flotálás lehetőségeit. Tanulmányuk szerint a legtöbb algaszuszpenzió túl homogén és annál kisebb részecskéket tartalmaz, hogy szűrhető legyen, hacsak nem tartalmaznak szálakat (makroalgák) [22].

Rawat és kollégái (2013) a laboratóriumi technológia méretnövelését, annak problémáit tanulmányozták. Tanulmányukban sorra veszik a szeparációs lehetőségeket, és összefoglalják azok előnyeit és hátrányait. Megállapítják, hogy néhány nagyobb mérettel rendelkező algafaj esetében, mint például a *Coelastrum proboscideum* és a *Spirulina platensis*, kivitelezhető a szűrés, de a kisebb sejtméretű fajok esetében, például *Scenedesmus*, *Dunaliella* és *Chlorella* nem oldható meg a hagyományos szűrés. Vákuum szűrővel némiképp javítható a folyamat, de csupán szakaszos műveletként és sokszori megszakítással [14].

1.7.2. Ülepítés

Az ülepítés a szilárd-folyadék rendszerek elválasztásának egyik legfontosabb alapléte. Cél lehet a szilárdanyag tartalom növelése, töményítése (zagysűrités), de lehet cél tiszta folyadék kinyerése is (derítés). A zagysűritő, illetve derítő ülepítők működése a szilárd részecskék ülepedési sebességének elvén alapszik. Az ülepedési sebességet méréssel (szétülepedési idő mérése), vagy közelítő számítással határozhatjuk meg. Az utóbbi esetben nyugvó, newtoni fluidumban egyetlen, síma felületű, merev, gömb alakú szemcse mozgását vizsgáljuk végtelen térben (a készülék falaitól távol).

Gravitációs erőterben a szemcsére ható erők miatt a szemcse, a kezdeti gyorsulási szakasz után, állandó úgynevezett határsebességgel mozog, ez a szemcse ülepedési sebessége. Gömb alakú testek ülepedési sebességét lamináris tartományban a Stokes-törvény írja le:

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{18\eta} \quad (3)$$

ahol, v az ülepedési sebesség [m/s], d a gömb alakú, vagy annak gondolt, részecske átmérője [m], ρ_s a részecske sűrűsége [kg/m³], ρ_f a közeg (folyadék) sűrűsége [kg/m³], g [9,81 m/s²] gravitációs gyorsulás, η a közeg dinamikai viszkozitása [Pa·s].

- Irodalmi áttekintés -

Az ülepedési Reynolds-szám (Re_{ii}) értéke határozza meg az ülepedési tartományokat.

$$Re_{ii} = \frac{v \cdot d \cdot \rho_f}{\eta} \quad (4)$$

Lamináris tartományban $Re_{ii} < 0,6$, a közegellenállást a részecske felületén létrejövő súrlódás okozza. Algák üleptése esetén a sejtek körül a folyadék mozgása a szuszpenzióban mindig lamináris a kis szemcseméret és kis sűrűségkülönbség miatt. Nem gömb alakú szemcsék esetén úgynevezett alakfaktort, vagy korrekciós tényezőt használunk.

Ha a szemcsék közelében más szemcsék is vannak, koncentrált szuszpenzióban történik az ülepedés, akkor többféle kölcsönhatás is fellép. Ilyenkor gátolt ülepedésről beszélünk. A szemcsék által előidézett folyadékmozgás hat a közeli szemcsék mozgására is. Sűrűbb zagyoknál felléphet a szemcsék közötti súrlódás és ütközés is, az ülepedési sebesség csökken, de a szemcsék össze is állhatnak és a pehelyszerű formáció ülepedési sebessége megnő.

Az üleptők felületének közelítő meghatározására az alábbi összefüggés adódik:

$$A_{ii} = Q/v_{ii} \quad (5)$$

ahol, A_{ii} az üleptő felülete [m^2], Q a tisztított folyadékfázis térfogatárama [m^3/h], v_{ii} a gyakorlati ülepedési sebesség [ált. 0,5-0,8 v/m/h].

Például édesvízi *Chlorella* algasejt esetén - az alábbi értékek mellett: $d= 5 \mu m$, $\rho_s= 1070 \text{ kg/dm}^3$, víz (20 °C-on) sűrűsége $\rho_f= 998 \text{ kg/dm}^3$, viszkozitása $\eta= 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$ - az ülepedési sebességre $v_{ii} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} \sim 0,1 \text{ m/nap}$ érték adódik. Modelleléshez, számításokhoz zöld mikroalgákra ezt az értéket ($v_{ii} \sim 0,1 \text{ m/nap}$) javasolja a szakirodalom [194]. Így például 1 m^3 /nap algaszuszpenzió feldolgozásához 10 m^2 -es üleptő felület tartozik. A szuszpenzió tartózkodási ideje az üleptőben függ az üleptő mélységétől, ez függ a méretétől és a típusától. A szennyvízkezelésben alkalmazott üleptők általában 1-2 m mélységűek.

- Irodalmi áttekintés -

1 m ülepítő mélységet választva a fenti példához 10 m³-es ülepítő tartozik, ami 10 napos tartózkodási időt jelent. Ez alatt az idő alatt az algasejtek bomlásnak indulnak, így a szakirodalmi ajánlások alapján lehetőleg egy napon belül fel kell dolgozni a leszüretelt algaszuszpenziót.

Ferde lapok, tányérok elhelyezésével az ülepítő kapacitása növelhető, n számú ferde lamellát, lapot alkalmazva az ülepítő kapacitása elméletileg n-szer nagyobb lesz, vagy azonos kapacitáshoz szükséges ülepítő felület csökkenthető a „klasszikus” n-ed részére. A mi esetünkben például 10 db ferde lapot tartalmazó ülepítő esetén csak 1 m² felületű ülepítőre van szükség. Megtartva az 1 m ülepítő mélységet ebben az esetben már csak 1 napos tartózkodási idő adódik.

Az algatechnológiákban a szokásos, „hagyományos”, ülepítők alkalmazásához 0,1-1 m/h = 0,017 m/nap ülepedési sebességeket javasolnak [199].

A gravitációs ülepítők alkalmazása biomassza tömegtermelésére szolgáló algatechnológiákban nagyon alga-specifikus, elsősorban a méretük (5-1000 µm), alakjuk (gömb, tű, hengeres), mozgékonyaságuk és sűrűségük (1,03-1,23 g/dm³) miatt. Ez utóbbi erősen összetételfüggő (a szénhidrátok átlagos sűrűsége 1500 kg/m³, a proteineké 1300 kg/m³, a lipideké pedig 860 kg/m³), így a nagy lipidtartalmú sejtek ülepedési sebessége kisebb.

A fonalas algák (pl. *Spirulina*), és a kolóniákat alkotó algák (*Scenedesmus*, *Micractinim*) 50-100 µm-es csoportméretükkel viszonylag jól ülepíthető szuszpenziókat képezhetnek ($v_{ii} \sim 0,2-1$ m/h ülepedési sebességgel) [200].

A közlemények alapján a gravitációs ülepítők mikroalga-biomassza kihozatala, előkezelő műveletek nélkül, 60-65 % [201, 202]; a sűrítmény koncentrációja elérheti a 15 g alga/dm³ értéket is 0,5-1 g alga/dm³ bemenő szuszpenzió koncentráció mellett.

A „hagyományos” és a lamellás ülepítők fajlagos energiafogyasztása - a fázisok mozgatása miatt - kb. 0,1 kWh/m³ algaszuszpenzió [198]. Egy ülepítő üzemi költsége kb. 1/5-e egy ugyanolyan körülmények között dolgozó szűrőnek.

1.7.2.1. Ülepítés centrifugális erőterben

1.7.2.1.1. Centrifugák

Az ülepítés hatásosabbá tehető, ha centrifugális (inercia) erőterben történik. A centrifugákra az a jellemző, hogy bennük a közeg együtt mozog a centrifuga forgórészével, tehát üzem közben a közegnek és így a vele együtt forgó részecskéknek a szögsebessége állandó, így növelve az ülepedés sebességét. A centrifugálás kedvelt módszer, mivel gyors, hatékony és univerzális, ám magas beruházási és üzemeltetési költségekkel bír. A nagy ráfordításon túl jelentős a biomasszaveszteség. A gravitációs ülepítés ennek éppen az ellenkezője: lassú folyamat, költségei azonban meg sem közelítik a centrifugálását.

Kamrás centrifugákat kis szárazanyag-tartalmú szuszpenziók (kb. 1-10 g/dm³) derítésére célszerű használni. Az ülepítési út rövidítése és a tartózkodási idő növelése érdekében a dob több (2-6) koncentrikus hengerre van felosztva. A centrifuga közepén bevezetett szuszpenzió keresztáramlik az egyes kamrákon. A dob felosztása kamrákra jelentősen megnöveli a folyadék tartózkodási idejét. A hosszabb tartózkodási idő (hosszabb ülepedési út) lehetőséget nyújt a kisebb átmérőjű szemcsék kiülepedésére is.

Tányéros centrifugák (szeparátorok) esetében az ülepítési úthossz minimálisra csökken. A dob belsejében kúpos, vékony lemezből készült betéteket helyeznek el. A folyadék a tányérbetétek között vékony rétegben laminárisan áramlik. A 200-400 mm átmérőjű dobba 40-120 db tányért építenek be. A tányéros szeparátorok alkalmazási területe gyári ajánlások alapján 3-30 µm-es szemcseméret és 0,1-3 v/v% szilárd anyag. Ezek a jellemzők szinte ideálissá teszik ezt a típusú centrifugát mikroalgák kinyerésére.

Tányéros és tányéros-fúvókás szeparátorokat jelenleg is használnak nagy tömegű, értékes alga-biomassza gyors és adalékmentes kinyerésére. A feldolgozásra kerülő szuszpenzió koncentrációja 0,5-2 g alga/dm³, a sűrítmény koncentrációja pedig általában 100-120 g alga/dm³ [196]. Külön előnye a berendezéseknek, hogy könnyen tisztíthatók, sterilizálhatók.

Dekantálók (vízszintes tengelyű csigás ürítésű ülepítő centrifugák) esetében a centrifuga belsejében egy szállítócsiga van elhelyezve. A dobbal azonos irányban forog, de különböző sebességgel. A szuszpenziót a forgási középpontban elhelyezett betápláló csövön keresztül vezetik be a dobba.

- Irodalmi áttekintés -

Itt felveszi a dob sebességét, és a centrifugális erő hatására az iszap a dob falánál, míg a kisebb sűrűségű folyadék a belső koncentrikus rétegben helyezkedik el. A dekanterek általában 3 %-nál nagyobb koncentrációjú szuszpenziók derítésére alkalmasak.

Kamrás centrifugák fajlagos energia fogyasztása igen jelentős, eléri a 15 kWh/(m³ szuszpenzió) értéket is. A tányéros szeparátoroknak lényegesen kisebb az energiafogyasztása: például a Westfalia HSB400 centrifugája 35 m³/h algaszuszpenzió feldolgozásakor 50 kW teljesítményt igényelt. Ezekből az adatokból 1,4 kWh/(m³ szuszpenzió) fajlagos energiaigény adódik [198]. Ennél kedvezőbb értéket (1 kWh/m³ szuszpenzió) kaptak egy szintén Westfalia szeparátorral *Scenedesmus* alga kinyerésére. 1 g alga/dm³ koncentrációjú szuszpenziót dolgoztak fel, és eredményül 120 g alga/(dm³ sűrítmény)-t kaptak [196].

Dekanterekkel is hasonló hatékonysággal dolgozhatók fel az alga-szuszenziók, nagyobb koncentrációjú terméket (alga-pasztát) szolgáltatnak, de lényegesen nagyobb, 8 kWh/(m³ szuszpenzió) a fajlagos energiaigényük [196]. Ezért „elősűrített” alga-szuszenziók feldolgozására javasolják.

Az Evodus cég legújabb fejlesztésű úgynevezett „spiral plate” centrifugáit még az előzőeknél is jobb fajlagos energia értékek jellemzik [199, 217].

0,25 g alga/dm³ *Nannochloropsis* alga szuszpenzió besűrítése 31,5 m/m% szárazanyagtartalmú alga-pasztává 1,9 kWh/(kg száraz alga) fajlagos energiát igényel. Így a besűrítésre felhasznált energia „csak” 34 %-a az alga energiatartalmának (5,55 kWh/kg ~ 20 MJ/kg száraz alga).

Az Evodus cég közleménye alapján a speciális centrifugáikra az **3. táblázat** szerinti adatok jellemzők mikroalgák esetén [199, 217].

3. táblázat Evodus cég algasűrítésre vonatkozó adatai [199, 217]

Kiindulási algakonzentráció [g alga/dm ³ szuszpenzió]	Fajlagos energiaigény, [kWh/kg száraz alga]	Energia mérleg* [%]
0,25	1,90	34,0
0,50	1,01	18,0
0,75	0,76	13,7
1,00	0,53	9,5
1,25	0,49	8,9
1,50	0,45	8,1

* a besűrítésre felhasznált energia az alga energiatartalmára vonatkoztatva

- Irodalmi áttekintés -

A rendkívül vonzó fajlagos energiaigényen túl a jó kihozatal (> 95 %) és a nagy szárazanyag tartalmú termék (30-35 m/m% szárazanyag tartalom és kb. 2 % szabad víz tartalom) igen vonzóvá teszi az ilyen típusú berendezések használatát.

Dassey és Theegala (2013) kutatásai fókuszában a mikroalgák szeparációja áll, mert az ipari méretű algatechnológia kulcs kérdése a szeparáció intenzifikálása. Megállapították, hogy a centrifugálás, bár kellően nagy intenzitású szeparációt eredményez, nagy energiaigénnyel rendelkezik, és ennek következtében magas üzemeltetési költségekkel alkalmazható művelet. A centrifugálás csak a nagy algakoncentrációjú és magas lipidtartalmú szuszpenziók esetében lehet rentábilis. A centrifugálás körülményeit vizsgálták, hogy definiálható legyen egy olyan optimális működtetés (a betáplált szuszpenzió algakoncentrációja és lipid tartalma mellett), amellyel minimalizálható a centrifugálás energiaszükséglete [100].

Leite és munkatársai (2013) kutatásaik alapján szintén azt a megállapítást tették, hogy a centrifugálás sok esetben eredményesen alkalmazható lenne, viszont energiaigénye nem megengedhető az üzemanyag előállítását célzó algatechnológia esetében [22].

Rawat és kollégái (2013) szerint, a fentiekkel hasonló módon megállapították, hogy a centrifugálás hatásos módszer az algaszuszpenzió sűrítésére, de nagy energiaigénye magas üzemeltetési költséget jelent, ami nem megengedhető [14].

A centrifugálás beláthatóan nagy energiaigényű művelet, ami az adott technológia esetén kerülendő.

Az algák méretéből adódóan is jelentős biomasza veszteséggel kell számolni, mert nem alkalmazható olyan szűrőszövet, amely az 1-2 mikronos sejteket visszatartja. Emellett a szűrőszövet alkalmankénti cseréje is szükséges, ami megint csak emeli az adott művelet költségeit.

1.7.2.1.2. Hidrociklonok

Itt a fentiekhez hasonló módon centrifugális erőterben történik az elválasztás, de más szerkezeti megoldással. A centrifugákban a dob forgásával hozunk létre centrifugális erőteret, és ennek hatására a dobba juttatott folyadék adott, a viszkozitással arányos veszteséggel felveszi a dob fordulatszámát és vele együtt forog.

A hidrociklon esetén az álló dobba nagy sebességgel betáplált mikroalgaszuszpenzió körpályára kényszerül, és fékeződik (a viszkozitásával arányosan).

- Irodalmi áttekintés -

A szerkezet hengeres-kúpos készülék, melynek hengeres részén tangenciálisan vezetik be kellő nyomással a szuszpenziót. A közeg nagysebességgel kering a készülékben, miközben a tengelyvonalban lévő kifolyónyílások felé halad. A híg fázis a hengeres rész fedelének központos csövén, a sűrű zagy a kúp csúcsánál távozik a hidrociklonból.

A hidrociklonok elválasztási „élessége” lényegesen kisebb, mint a centrifugáké, „nagy méretű” mikroalgák esetén kb. 1 g alga/dm^3 koncentrációjú mikroalga szuszpenziók feldolgozásával elérhető 4 g alga/dm^3 sűrűzagy koncentráció is. A hidrociklon fajlagos energiaigénye kb. $0,3 \text{ kWh/m}^3$ [196]. A művelet eredménye jelentősen algafaj- és termesztéstechnológia-függő, a hatásfoka függ a szuszpenzió koncentrációjától is [203]. Csak nagy sűrűségkülönbségek esetén használhatók eredményesen [127, 128].

Mivel a kezelendő mikroalga-szuszpenzió esetén, a sejtekre a több mint 95 %-os víztartalom jellemző, ezért az utóbbi kritériumnak nem felel meg, aminek következménye, hogy hidrociklonnal nem lehet eredményes biomassza elválasztást elérni a mikroalga-szuszpenziók esetében.

1.7.2.2. Ülepítés adalék hozzáadásával

Vannak tisztán mechanikai eljárással szét nem választható több fázisú rendszerek, amelyekben kolloidális méretű lebegőanyagok is jelen vannak melyekre a Brown-féle mozgás törvényei érvényesek. A Brown-mozgás jelen esetben a tápoldatban lebegő (szuszpendált) algasejtek szüntelenül zajló, véletlenszerű mozgását jelenti. A víztérbeli stabilitásukat a felületi erők, a molekuláris vonzásból (Van der Waals erő) és az elektrosztatikus taszításból (Coulomb erő) származó eredő erő befolyásolja. A kolloid szemcsék (algasejtek) felületén rendszerint negatív töltésű ionok helyezkednek el. Ezt a pozitív töltésű adszorpciós réteg veszi körül. E körül helyezkedik el az ismét negatív töltésű diffúziós réteg. A két réteg közti potenciálkülönbség az úgynevezett zéta potenciál. Ahhoz, hogy az ülepedést elősegítsük, ezt kell csökkenteni. Ennek eléréséhez a kolloid részecskék töltésével ellentétes töltésű kolloidokat juttatunk a rendszerbe [129]. Ezáltal a szemcsék negatív feszültségű állapota közömbösíthető, így a vonzás válik uralkodóvá. A részecskék tömörödnek, felúsznak vagy ülepednek.

- Irodalmi áttekintés -

Első lépés a só adagolása ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), majd az ezt követő második lépés a *pH*-érték beállítása. Ezen túl egyéb adalékanyagokat is használnak koaguláltószerként, mint például vas-klorid, alumínium-klorid stb. [130]. A vizek tisztításakor a töltés semlegesítésére elsősorban Fe^{3+} és Al^{3+} ionokat használnak. A háromértékű fém-sók alkalmazásának előnye a hidrolizáló sajátágaikban is rejlik. A beadagolt sókból képződő hidroxid csapadék pozitív töltésű stabil kolloid rendszert képez. Pelyhek képződnek, amelyek megkötik a ki nem ülepedett részecskéket (koaguláció).

Az ülepítők teljesítményét növelő pelyhesítő anyagok (flokkulálószer) adott körülmények között jelentős mennyiségű kolloid anyagot képesek „pelyhes” állapotba hozni, ami a méretnövekedés révén nagymértékben növeli az ülepítés hatásfokát.

Flokkulálószer (nagy molekulatömegű láncpolimerek), amelyek a szuszpenzióban diszpergált különböző töltésű részecskékhez nagy aktivitású oldalláncokkal kapcsolódnak, azokat pelyhekké gyűjtik, s ezáltal önmagukban, vagy más részecskékhez kapcsolódva megnövelik a rendszer ülepedési sebességét. Napjaink legfontosabb flokkuláló, derítőszerai a polimerizált alumíniumvegyületek, a polialumínium-kloridok, például a *BOPAC* elnevezésű készítmény. Ezek használatakor a vízben kolloidiálisan diszpergált részecskék koaguláltatása eredményeként gyorsan ülepedő és jól szűrhető flokkulátumokat adnak, a szuszpenziók *pH*-jától gyakorlatilag függetlenül.

Ayhan (2010) valamint Rawat és munkatársai (2011) kutatásaik során megállapították, hogy a flokkuláció a töltések szétválásának elvén jól működik az algaszuszpenziók esetében is, mivel a mikroorganizmusok többnyire negatív töltésűek. Fém-sók hozzáadása kiváltja a töltést és lehetővé teszi a kapcsolódást, így könnyebb ülepíteni vagy szűrni. A kémiai anyagok használata gyakran túl drága nagy mennyiségű algaszuszpenziók szeparációja esetén [131, 132].

Grima és kollégái (2003), Uduman és kollégái (2011), Beach és kollégái (2012), valamint Riano és kollégái (2012) szintén megerősítették a fenti megállapítást, miszerint az algák negatív töltésének semlegesítése útján is elérhető a flokkok kialakulása vegyi adalékok alkalmazásával [133-136].

Leite és munkatársainak (2013) kutatásaiból jól látható, hogy a flokkulációnál bevitt vegyszer(ek) következtében szennyvíz-kezelést is be kell iktatni a technológiába, ami plussz költségként jelentkezik. Emellett ők is megállapították, hogy a megfelelő flokkok kialakítása nehézkes és körülményes [22].

- Irodalmi áttekintés -

Chen és kollégái (2012) kutatásaik során megállapították, hogy az ammónia is használható flokkulálásra, amelynek a flokkulálás után tápanyag funkciója (nitrogénforrás) van (bizonyos kezelések után), ez megintcsak nagymértékben alga faj és szuszpenzió minőségétől függő módszer [137].

Banerjee és munkatársai (2013) flokkulációs kutatásaik során, a tartósan homogén algaszuszpenziók vizsgálatát folytatták le. Vizsgálataik a kationos flokkulálást helyezték a középpontba, mégpedig a kationos guar gumi szintézis és pelyhesítés vizsgálatával. A szintetizált kationaktív guar gumi optimális dózisban két különböző zöldalga fajta flokkulálására használható (*Chlorella* és *Chlamydomonas*). A kationaktív guar gumival történő részecskesemlegesítéses flokkuláció alkalmassá teszi a szeparált biomasszát akár emberi fogyasztásra is az ipai felhasználhatóság mellett [138].

Chun Yong és kollégái (2012) a nagy koncentrációjú mikroalga-termesztést tanulmányozták szabadtéri körülmények között. Kis területigényű termesztő és szeparáló rendszert dolgoztak ki, amelynek telepítése városi környezetben lehetséges. Flokkulációs technikával 20 % szárazanyag tartalmú sűrítményt értek el. Különböző algakonzentrációs értékek és különböző *pH* értékek mellett vizsgálták a flokkuláció hatásfokát. Vertikális foto-bioreaktorok tenyésztési képességeit ($C_{max.} = 2 \text{ g/dm}^3$) és a termesztett algaszuszpenzió besűrítési rátáját vizsgálták szerves polimer flokkulálószerrel [54].

Schlesinger és kollégái (2012) is arra a megállapításra jutottak, hogy flokkulálásnál egy vegyszermentes, olcsó, kis energiaigényű flokkulálás jöhetne szóba. A hozzáadott vegyszerek a későbbi feldolgozásban zavaróként jelennek meg. Nincs még optimálisan alkalmazható, kidolgozott vegyszermentes elválasztás, így a vegyszeres flokkulálást vizsgálták. Nagyon sűrű kultúra, szuszpenzió esetén azt találták, hogy lényegesen könnyebb a flokkulálás, így potenciálisan csökkenthető a szeparáció költsége [139].

Rawat és kollégáinak (2013) kutatásai alapján alumínium-szulfát és vas-klorid alkalmazható a pelyhesedés intenzifikálására. Kationos polimer vegyületek (polielektrolitok) használata is kellőképpen gyorsíthatja a kiülepedési folyamatot. A flokkulálószeres adagolását bizonyos további feldolgozások esetén nem javasolják, mivel zavaró hatást fejtenek ki. A szerzők tapasztalatai alapján a vegyszeres flokkulálás hiába alkalmas az algaszuszpenziók sűrítési módszereként, vegyszer igénye, környezetterhelése és körülményes kivitelezése miatt más egyéb szeparációs módszerekben kell keresni a megoldást, mint például az elektroflokkuláció [14, 132].

Jimin és munkatársai (2013) CaCl_2 és FeCl_3 flokkuláló szerek hatásának vizsgálatát végezték el különböző *pH* értékeken. A legjobb flokkulációs aktivitást 11-es *pH* értéknél mérték [101].

A fent leírtak szerint, noha az adalékanyagokkal segített kiülepítés eredményesnek mondható, az adalék anyagok szennyvízként jelennek meg az output áramban, vagy a leválasztott, algamentesített szuszpenzióban, amelynek további kezeléséről gondoskodni kell. Ezen kívül megállapítható, hogy a flokkulálási technika alkalmazása esetén minden szarzsot adott analitikai vizsgálatoknak kell alávetni, hogy a vegyszerigény meghatározható legyen.

1.7.2.2.1. Elektroflokkuláció

Az elektroflokkulációs módszerek elektrolitikusan állítják elő a flokkulálást előidéző fémionokat. A fogyó elektród általában alumínium vagy vas. *Chlorella* és *Phaedactylum* algák esetén anódként az alumínium előnyösebb, mint a vas [204].

A művelet fajlagos energiaigénye függ a szuszpenzió sótartalmától is, a tengeri alga esetén 0,3 kWh/kg alga, az édesvízi alga esetén 2 kWh/kg alga [205].

Az energiafogyasztása számos paramétertől függ: az alkalmazott feszültségtől, áramerősségtől, áramsűrűségtől; az elektródok anyagától, geometriájától, elhelyezésétől, távolságától; a szuszpenzió koncentrációjától, vezetőképességétől, *pH* értékétől. Az elektródokat rendszeresen cserélni kell [205].

A termékek szennyezésprofilját (különböző mennyiségű és minőségű szennyezőket tartalmaz) tekintve, ez a változat jó közelítéssel azonos a vegyszeres, három vegyértékű fémsókat alkalmazó módszerekkel. Mind a sűrű zagy, mind a természetes közeg szennyezett lesz a fémionokkal, ezért nem célszerű alkalmazni.

Jungmin és kollégái (2012) kutatásaik alapján megállapították, hogy egy folyamatosan működő természetes rendszerhez fontos egy megfelelően és folyamatosan üzemen működtethető arató, elválasztó rendszer kialakítása. A folyamatos sűrítés lehetőségeként elektromos cellák alkalmazhatóságát vizsgálták (elektroflokkuláció). Különböző elektródok vizsgálatát végezték el. Arra a megállapításra jutottak, hogy az Al-Ti/RbO₂ elektród jobban alkalmazható, mint az Al-Pt, mivel kisebb beoldódás elég volt és így a költségek is csökkennek (kisebb műveleti idő, kisebb elektromos fogyasztás, kisebb mértékű elektróda beoldódás) [145].

Mascia és kollégái (2013) *Chlorella vulgaris* elektrokémiai eltávolíthatóságát vizsgálták szuszpenzióból. Elektroflokkulációs kísérleteiket szakaszos és folyamatos kialakításban egyaránt végezték. Megállapították, hogy a technológia további tanulmányozásra és fejlesztésekre szorul. A szeparációs mód érzékeny az algakonzentrációra [146].

Lee és munkatársai (2013) tengeri alga elektroflokkulációs vizsgálatát végezték, energiaigények figyelembevételével, a szeparáció energiaigényének minimalizálását célozva. $0,33 \text{ MJ/m}^3$ algaszuszpenziós értéket kaptak az elektroflokkuláció energiaigényeként [147].

1.7.2.3. Speciális ülepítés

1.7.2.3.1. Autoflokkuláció

Algapopulációk bizonyos külső behatásokra reagálva (esetek többségében nem pontosan definiált) flokkokba állnak össze és megindul a kiüledésük. Kiváltó okoknak a *pH* változását, valamint az ennek következtében kiváló sókat tartják [22, 218, 219]

Az autoflokkuláció legegyszerűbb módon a szén-dioxid betáplálás megszüntetésével idézhető elő. A szén-dioxid betáplálás megszüntetésével (levegő betáplálás mellett) megkezdődik az algák lassú, kismértékű üledése.

A folyamat esetében még nem tisztázott a beporlasztott oxigén, besugárzott fény, jelenlévő táp- és/vagy anyagcsere komponensek, illetve az algaoldat hőmérsékletének szerepe, valamint az említett paraméterek kapcsolatrendszerének az üledésre gyakorolt hatása.

A sejtek telepekbe állnak össze az üledés közben/végén, ami mind a tápanyag-felvételt, mind pedig az energia (fény) felvételét megakadályozza [140, 141].

Ismeretes néhány algafaj autoflokkulációjának vizsgálata, például egy tengeri alga esetében, *Nannochloropsis oceanica* [142], és hasonlóképpen, egy autoflokkulációs tanulmány egy *Scenedesmus* faj esetében [143].

Leite és munkatársai (2013) kutatásaik során foglalkoztak azzal a jelenséggel, hogy néhány jellemző körülmény kialakulása, ill. bizonyos körülmények (szakirodalmak által nem definiált) fennállása esetén autoflokkuláció indul meg, ami biztató a technológiai költségcsökkentése szempontjából [22].

Jimin és munkatársai (2013) a baktériumok által előidézett autoflokkulációs jelenséget vizsgálták. Kutatásaik szerint a baktériumok kulcs szerepet játszanak az algák autoflokkulálásában és ülepedésében. Kutatásaik alapján három baktérium: *Flavobaktérium*, *Terrimonas* és *Sphingobaktérium* játszik kulcs szerepet a *Chlorella vulgaris* pelyhesedésében, flokkulációjában, az által, hogy nagyobb flokkok alakulnak ki, amelyek jobban ülepednek, így könnyítve az elválasztást [101]. Mivel a jelenség a szakirodalom szerint nem pontosan definiált, ezért Jimin és munkatársainak (2013) kutatásai noha (baktériumok bizonyított jelenléte miatt) sokkal inkább tartoznak a bio-flokkulációhoz, elfogadható, hogy ők ezt autoflokkulációs jelenséggént értelmezték.

A fentebb leírtakat Kim és kollégáinak (2011) kutatásai is alátámasztják, miszerint különböző baktérium kultúrák jelenléte is előidézheti az autoflokkuláció jelenségét [144].

Leite és munkatársai (2013) megfigyelték, hogy néhány speciális algafaj esetén elég a kevertetés, hogy kiülepedjék az alga vagy épp felússzon. Ezen speciális algafajok művelése viszont alaposabb odafigyelést igényel; körülményes a termesztésük, mivel szaporításuk közben is nehezen vagy nem tarthatók homogéneken a tápoldatban [22].

Rawat és kollégáinak (2013) kutatásai szerint az autoflokkulációs jelenségek 8,5-ös *pH* felett beindulnak az algasejtek negatív töltéseinek semlegesítődése következtében. Az autoflokkulációs jelenséget felhasználva, könnyebben ülepíthető, szűrhető vagy centrifugálható a szuszpenzió [14].

Mivel ebben az esetben az ülepítés nem igényel különösebb energia befektetést, és ezáltal nem igényel további pénzbeli ráfordítást, érdemes vizsgálni, hogy a jelenség miként váltható ki és milyen módon irányítható. Célszerű megvizsgálni, hogyan lehet növelni az eddigiekben megfigyelt autoflokkuláció intenzitását a felhasználhatóság érdekében.

1.7.2.3.2. Szonokémiai művelet

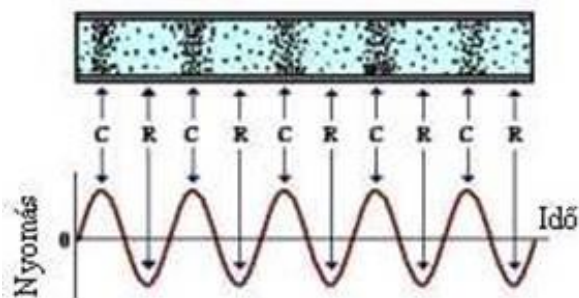
A teljesség igénye nélkül a szeparációs technikák irodalmából származó érdekességet szeretnék megemlíteni, amely az ultrahangot használja fel a pelyhesedés jelenségének előidézésére.

Az ultrahang 16 kHz frekvencia feletti mechanikai hullámokat jelent. Természetesen ez a frekvenciatartomány az emberi fül számára általában már nem érzékelhető.

- Irodalmi áttekintés -

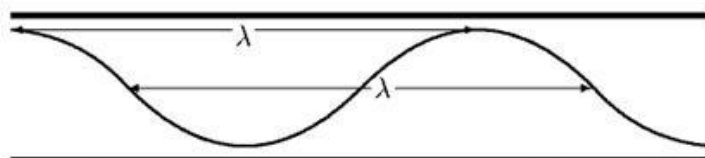
Az ultrahangot aktív és passzív tartományra osztják, vagyis megállapodás szerint az 1 W/m^2 teljesítmény alatt passzív, míg felette aktív ultrahangról beszélünk. A passzív ultrahangot leginkább az anyagtulajdonságok vizsgálatára, míg az aktív ultrahangot az anyag tulajdonságainak a megváltoztatására alkalmazzák.

Az aktív ultrahang anyagtulajdonság befolyásoló képessége az anyagban kialakuló hullám- és akusztikai jelenségekkel függ össze. Folyadékokban és gázokban longitudinális hullámok, míg szilárd anyagokban - emellett többek között - a tranzverzális és a tágulási hullámok is fellépnek. Ez utóbbiakra - egyebek mellett - egy adott szilárd anyagban eltérő hangsebességek jellemzőek. Longitudinális hullám esetén a hullámmozgást végző közeg sűrűsödései (C) és ritkulásai (R) a hullám terjedésének irányában vannak (5. ábra).



5. ábra Longitudinális hullám (C, sűrűsödések; R, ritkulások)

A longitudinális hullámoknál, amennyiben egy szinuszhullámra gondolunk (6. ábra), úgy rögtön feltűnik, hogy egy hullámon belül van egy fel- és egy lefelé irányuló ív. Ezek együttese egy hullámhossz (λ) nagyságú, amely az adott anyagra jellemző hangterjedés sebességének (c_h) és az alkalmazott frekvenciának (f) a hányadosa, vagyis $\lambda = c/f$.



6. ábra Szinuszhullám

Riera-Franco de Sarabia és munkatársai (2000) nagyenergiájú ultrahangot alkalmaztak a szilárd részecskék folyadékokból történő eltávolítására. Az ultrahang ipari alkalmazhatóságának legújabb zászlóshajójaként ezt az alkalmazási módot tekintik a konvencionális szeparáció erősítésére a leghatékonyabb megoldásnak [148].

Tolt és Fekete (1993) diszperz fázist választottak el folyadéktól akusztikailag besugárzott kamrában. A szeparációt egy csőben végezték 0,35-1,41 MHz frekvencia tartományban és 25 W teljesítmény mellett. A cső egyik alumínium végéhez ólom-cirkonát piezokerámia csatlakozott. Ez az akusztikai erőteret kihasználó módszer, a finom másodlagos fázist a kamrán átfolyó fázisból folyamatosan el tudta választani. Az akusztikai sugárzási erő a másodlagos fázist az állóhullám nyomási csomósíkjaiba terelte, és az áramló szuszpendáló szerhez képest ott megtartotta azt [149].

1.7.2.3.1. Bioflokuláció

Algák flokkulációját elő lehet idézni különböző mikroorganizmusokkal (algák, baktériumok, gombák) is [196]. Szennyvizet használó, nyílt rendszerű természetes rendszerekre szinte általánosan jellemző a sokféle alga és baktériumok szimbiózisa. Ilyen körülmények között az alga/baktérium-biomassza nagy kolóniákat alkot (bioflokuláció), és ülepitéssel hatékonyan kinyerhető [206].

Ismeretes olyan technológia is, ami lényegében egy 5 hektáros (4 db 1,25 ha-os) raceway-pond, speciálisan tervezett ülepitő, amely 1-2 m/m% -ra sűríti a szerves anyagot (alga/baktérium biomasszát) minden adalékanyag és kezelés nélkül [207].

1.7.3. Flotálás

A flotálás az anyagok felületi adhézios sajátságainak eltérésén alapuló dúsítási eljárás, amely különböző anyagok felületének a levegőhöz és vízhez való eltérő tapadásán alapul. A víz vagy levegő megtapadását a szilárd szemek felületén, a megfelelő reagensek hozzáadásával, módosítani, azaz fokozni vagy mérsékelni lehet. Sőt, a szilárd szem felületének a vízhez vagy levegőhöz tapadására való hajlamát az ellenkezőjére is meg lehet változtatni. Ha légbuborékokat diszpergálnak a szuszpenzióba, ezekhez hozzátapadnak az aerofil, hidrofób anyagszemcsék, és a buborékokkal együtt felszállnak a szuszpenzió felszínére.

- Irodalmi áttekintés -

Alkalmas reagensek hozzáadásával a buborékok nem pattannak azonnal szét, hanem hosszabb-rövidebb ideig megmaradnak a szuszpenzió felszínén, ott többé-kevésbé tartós habot képezve. A gáz fázis anyagi minőségben való eltéréseinek nincsen nagy befolyása a flotálás eredményére: levegő helyett más gáz, például füstgáz vagy akár CO₂ is lehet ez a fázis (amennyiben a termesztő rendszer ilyen gázforrással van installálva, célszerű erre a célra is azt felhasználni).

Az algák flotálhatóságát azonban befolyásolhatja, ha az algák felülete, vagy a víz, vagy az ebben oldott reagensek és a gáz molekulák között kémiai reakció játszódik le. A folyadék fázis mindig víz, helyesebben híg vizes oldat. A víz oldó ereje és ionizáló ereje nagy. A víz molekulái hajlamosak az egymás közötti asszociálódásra és idegen ionok hidratizálására. A flotálásban többé-kevésbé hidratált ionok tapadnak az algasejtek felületére, azt vízhártyával vonva be, de a sejtek felületi ionjai maguk is hidratálódhatnak. Hatékony algasűrítés eléréséhez általában flokkulálószer, felületaktív anyagok adagolása is szükséges a flotálási művelet előtt. Az elválasztott, habos, mikroalgában dús szuszpenzióban az alga koncentrációja elérheti az 5-7 m/m% értéket is [199, 208]. A levegőbuborékok előállítására alapján megkülönböztetünk:

- diszpergált levegős (*SAF*): porózus közegen keresztül vezetik be a levegőáramot, a buborékok mérete általában 1-2 mm,
- oldott levegős (*DAF*): nagy nyomáson levegővel telített vízzel viszik be a levegőt, a buborékok mérete 10-100 µm,
- mikrobuborékos: legújabb változatok, ún. fluid-oszcillátorral állítják elő, a buborékok mérete <80 µm [199],
- elektrolitikus gázfejlesztést.

A mikroalgák flotálással történő besűrítésére alkalmazott berendezéseknek, ill. konstrukciós változatoknak, a műveleti paraméterek sokaságán túlmenően, a fajlagos energiaigénye is nagyon különböző [209]. Szakaszos pilot berendezésben, 100 dm³ szuszpenzió-térfogat, szennyvízben szaporított, nagyrészt *Chlorella* és *Scenedesmus* algakon végzett vizsgálatok alapján közel azonos kihozatalra (84,9 % ill. 83,4 %) a *SAF* művelet 0,3 Wh energiát fogyasztott, míg a *DAF* változat 760 Wh-t igényelt. Ezeket az adatokat 1 m³ szuszpenzióra vonatkoztatva az alábbi fajlagos energiafogyasztásokat kapjuk: *SAF* művelet 3 Wh/m³ szuszpenzió, *DAF* változat 7,60 kWh/m³ szuszpenzió [209].

- Irodalmi áttekintés -

Scenedesmus quadricauda alga flotálással (SAF) történő kinyerése esetén, a flotálás hatásfokát megvizsgálva (pH, ionerősség, levegőáram függvényében), különböző felületaktív anyagok szerepét is tanulmányozva a **4. táblázat**ban feltüntetett értékek adódtak [210].

4. táblázat Felületaktív anyagok vizsgálata flotálásnál

Felületaktív anyag	Algakinyerés hatásfoka [%]
Triton X-100, nemionos	10
Nátriun-dodecilszulfát (SDS), anionos	10
Cetyl-trimetilammonium bromid (CTAB), kationos	90
Cetyl-trimetilammonium bromid + Chitosan	nagyobb mint 90

A flotálás egy különleges esete a habflotálás. Ekkor egy stabil, magas haboszlopot képeznek az algaszuszpenzióból. Egyes esetekben különböző fajtájú alga kinyerését vizsgálják a fenti művelettel, olyan módon, hogy nem használnak felületaktív anyagokat, hanem a szuszpenzió pH értékét csökkentik [211]. A részletes eredmények *Chlorella sp.* algára bemutatva a következők. pH 5-7 tartományban szinte nincs hab, majd 4,5 értéktől 2,5-ig erősen növekszik a habmagasság (néhány cm-ről 90 cm-ig). 15 perc alatt közel 100 % algakinyerést értek el, a habban az alga 50-60 g/dm³ koncentrációban nyerhető ki, a koncentrációs faktor 40-200 tartományban változott. A művelet 1 dm³ szuszpenziót 20 perc alatt dolgoz fel, 200 Ncm³/perc levegőáram mellett. Így a levegőfogyasztás 4 Ndm³ levegő/dm³ szuszpenzió [211]. 1 Nm³ levegő 2 bar-ra történő komprimálásához 20 Wh energia szükséges. Ezek alapján a fenti művelet fajlagos energiaigénye: (4 Nm³ levegő/m³ szuszpenzió) x (20 Wh/m³ levegő) = 80 Wh/m³ szuszpenzió.

Cowarda és munkatársai (2013) hasonló műveletet vizsgáltak (szuszpenzió pH-ját nem változtatva) a különböző felületaktív anyagok (cetil-trimetilammonium bromid /CTAB/, Ecover /biológiailag lebontható/) adagolása miatt. Tanulmányozták a levegőáramot, a műveleti időt, a haboszlop-magasságot, a felületaktív anyag koncentrációját, típusát, hatását a kihozatalra és koncentrációs faktorra. A felületaktív anyagokat 10-20 mg/(dm³ szuszpenzió) koncentrációban adagolták. A habmagasság 500-2500 mm között változott. A kiindulási szuszpenzió térfogat 10 dm³, koncentrációja 0,11 ± 0,08 g alga/dm³. A kihozatal megközelíti a 100 %-ot, a koncentrációs faktor értéke a hab tartózkodási idejével arányos [212].

- Irodalmi áttekintés -

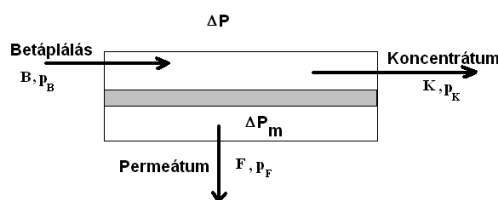
A levegőáramból, a flotálás idejéből és a nyomásesésből lett megbecsülve a művelet fajlagos energiaigénye ($0,015 \text{ kWh/m}^3$ szuszpenzió). Latex gyöngyöket használtak kísérleteiknél, hogy kimutassák azt, hogy a habképzés jócskán javítja a alga biomassa szüretelésének hatásosságát. Ez a kutatás rávilágít, hogy a hatékony mikroalga szüretelésnél a hab meglétének időtartama fontos befolyásoló tényező, amely ez idáig ritkán került előtérbe [150].

Barrut és munkatársai (2013) vákuumos gáz-lebegtetéses (vacuum gas lift) kísérleti berendezéssel végezték kísérleteiket. A mikroalga előállításának és szüretelésének gazdaságossága szempontjából fontos az alacsony energiafogyasztású és költséghatékony szüretelés, melynek során az algát a víztől elválasztják. A szüret eredményessége és a koncentrációs ráta növekedett, ha a légáram és a buborékok mérete csökkent. Kísérleteiknél speciális mikro buborék diffúzort használtak. Optimalizált vákuumgáz energiaigénye a részleges mikroalga szüretelésnél kevesebb, mint 0.2 kWh/kg , ezáltal csökkenteni az energiafelhasználást, bár az algakoncentráció is kisebb értékű [151]. Különböző vég koncentrációkat értek el a kiindulási szuszpenzió mennyiségének függvényében, amit a **F8. függelék** tartalmaz.

Rawat és kollégái (2013) vizsgálták a flotálás és flokkuláció összekapcsolását, ahol a kialakult flokkokat buborékokkal lebegettették a folyadék tetejére, és az így leföldrőzött hab 7-10 % szárazanyag tartalmú besűrítést eredményezett. Ezen technológia fő hátránya szintén a kémiai reagensek (flotáló reagensek, habképzők, flokkulálószer) bevitelben rejlik, ami a kinyert biomasszát szennyezi [14].

1.7.4. Membránműveletek

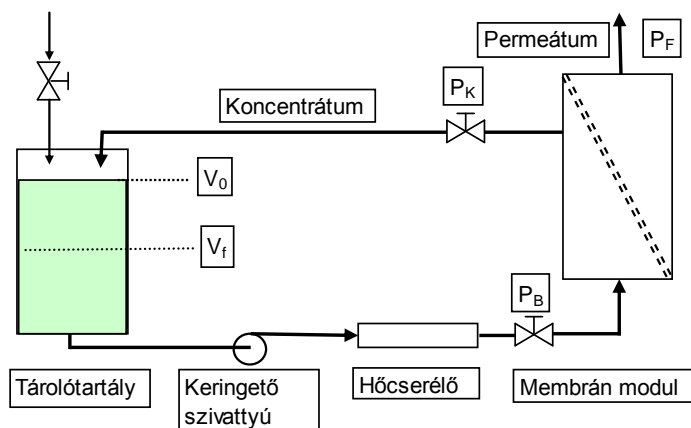
A klasszikus szűréssel, „makroszűréssel”, eltávolítható szilárd részecskék mérete általában néhány μm -nél nagyobb. Az ennél kisebb részecskék és az oldott anyagok eltávolítására a membránseparációs eljárások szolgálnak, melyek elvben különböznek a hagyományos szűrési módszerektől. Az eljárás neve keresztáramú membránszűrés, vázlatát a **7. ábrán** mutatom be.



7. ábra A keresztáramú membránszűrés elvi vázlatja

- Irodalmi áttekintés -

Az eljárásnál a betáplált elegy áramlási iránya párhuzamos a membrán felületével. A hajtóerő a membrán két oldala közötti nyomáskülönbség (Δp_m). A membrán permszelektív, az oldószerre nézve átjárható. A betáplált folyadékáram egy része keresztülhalad a membránon (permeátum áram), a visszatartott részecskék „koncentrálódnak” a maradék folyadékáramban és az úgynevezett koncentrátum árammal távoznak. A membrán által visszatartott részecskék ebben az esetben nem tudnak a felületen felhalmozódni, mivel azt folyamatosan tisztítja a felülettel párhuzamos „fő” folyadékáram, amelyet a ($p_B - p_K$) nyomáskülönbség tart fenn. Így a műveletet folyamatos üzemben is végezhetjük, mivel a membrán felülete mindvégig viszonylag tiszta marad, miközben az elegy koncentrátum részének recirkuláltatása folytán a sűrítmény egyre koncentráltabbá válik (**8. ábra**) [127, 128].



8. ábra A szakaszos membránszűrés kapcsolási vázlata

A visszatartott részecskeméreték alapján a keresztáramú membránszűrésnek négy változatát különböztetjük meg: mikroszűrés (0,1-1 μm), ultraszűrés (1000-500.000 D molekulatömeg), nanoszűrés (< 1000 D molekulatömeg, több-vegyértékű ionok), valamint a fordított ozmózist (csak a vizet engedi át).

1.7.4.1. A membránszűrést jellemző tényezők

A membránszeparáció a következőkben felsorolt paraméterekkel jellemezhető.

- **Szűrletfluxus:**

Az egységnyi membránfelületen átáramlott permeátum átlagos sebességét (J) áteresztőképességnek, fluxusnak nevezik:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV_p}{dt} \quad (6)$$

ahol, J a permeátum átlagos sebessége [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$], V_p a szűrlet mennyisége [m^3], A a membrán felülete [m^2], t idő [h] [127, 128].

A szűrletfluxusból vezethető le a permeabilitás, ha a nyomáskülömbőség mértékére, mint hajtóerőre viszonyítjuk a fluxust (mértékegysége [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{hbar}$]).

- **Membránvisszatartás:**

A membránok elválasztóképességét a betáplált elegy egy adott komponensére nézve az R_m visszatartási tényező jellemzi (membran rejection coefficient), így adott membrán esetén a különböző anyagokra, komponensekre más-más érték adódik:

$$R_m = 1 - \frac{c_2}{c_1} \quad (7)$$

ahol, R_m a visszatartási tényező, c_1 a koncentráció a membrán betáplálási oldalán, c_2 a koncentráció a membrán permeátum oldalán [127, 128].

- **Térfogat sűrítési arány:**

Szakaszos művelet esetén az eljárást a térfogat sűrítési aránnyal jellemezhetjük. Az eredetileg V_0 térfogatú oldat a művelet végén V_f térfogatú „sűrítmény” lesz. A térfogat sűrítési arány megmutatja, hogy a folyamat során a kiindulási elegy térfogatához képest mennyire sűrítettük be a retentátumot.

$$VF = \frac{V_0}{V_f} \quad (8)$$

ahol, VF a térfogat sűrítési arány, V_0 a kiindulási oldat térfogata, V_f a sűrítmény, retentátum térfogata [128].

- **Koncentrációs faktor:**

A koncentrációs faktor a betöményítés mértékére jellemző és megmutatja, hogy az eljárás végére a visszatartott komponensünk koncentrációja a sűrítményben hányszorosára növekedett a kiindulási koncentrációhoz képest:

$$CF = \frac{c_f}{c_0} \quad (9)$$

ahol, CF a koncentrációs faktor, c_0 a kiindulási oldat koncentrációja, c_f a sűrítmény, retentátum koncentrációja [128].

- **Kihozatal:**

A permeátum a termék, térfogatra vonatkoztatva:

$$Y_{VP} = \frac{V_P}{V_0} \quad (10)$$

ahol, Y_{VP} a termékként elvett permeátum térfogatára vonatkozó kihozatal, V_P a permeátum térfogata, V_0 a kiindulási oldat térfogata [128].

- Irodalmi áttekintés -

A permeátumban levő komponens a termék, komponensre vonatkoztatva:

$$Y_{CP} = \frac{V_p c_P}{V_0 c_0} \quad (11)$$

ahol, Y_{CP} a permeátum levő komponensre vonatkozó kihozatal, c_P a komponens koncentrációja permeátumban, c_0 a komponens koncentrációja a kiindulási oldatban [128].

A sűrítményben levő komponens a termék, komponensre vonatkoztatva:

$$Y_{Cf} = \frac{V_f c_f}{V_0 c_0} \quad (12)$$

ahol, Y_{Cf} a sűrítményben levő komponensre vonatkozó kihozatal, c_f a komponens koncentrációja a sűrítményben, c_0 a komponens koncentrációja a kiindulási oldatban [128].

A membránszűrés során fellépő legnagyobb probléma a fluxuscsökkenés, melynek oka a membrán pórusainak eltömődésében és a felületükön kialakult polarizációs rétegben keresendő. Koncentráció-polarizációs réteg kialakulása: Szűrés során a membrán felületén feldúsulnak a kiszűrendő komponensek, gélréteg alakul ki, a fluxus csökken. A gélréteg másodlagos szűrőréteget képezhet, ennek következtében a kisebb molekulatömegű komponensek visszatartása is nőhet. A gélréteg szerkezete, vastagsága erősen függ a szuszpenzió fizikai-kémiai tulajdonságaitól, az alkalmazott műveleti paramétereiktől.

A fluxuscsökkenés másik oka a membránok eltömődése (fouling): Felületi réteg, felületi adszorpció, csapadékképződés (scaling) okozhat eltömődést a membrán felületén, ill. a pórusokban. Az eltömődés során a fluxus annyira lecsökkenhet, hogy már nem lehet gazdaságosan üzemeltetni a berendezést. A membránt tisztítani kell. Reverzibilis eltömődés esetén a fluxus visszaállítható többé-kevésbé az eredeti értékre, irreverzibilis eltömődés esetén azonban a membránt ki kell cserélni [127, 128].

Discart és kollégái (2013) természetes környezetben felszaporított mikroalgák szeparációját vizsgálták membránszűrési technológiával. A sűrítést különböző minőségű és koncentrációjú algaszuszpenziók esetén végezték el. Méréseiket 3 különböző ultraszűrő membránnal végezték, különböző betáplálási minták esetén [156].

Méréseik szerint az alacsony nyomású mikroszűrő membrán hatástalan az algák kiszűrésére, a membránon kialakuló biomasszaréteg következtében [156].

Duu-Jong és kollégái (2012) a membránszűrést ítélték eredményesnek az algaszuszpenziók kezelésére. A póruseltömődés elkerülésére adalékanyag(ok) alkalmazását vizsgálták. Stabil flokkulátumok kialakításával meg tudták gátolni a póruseltömődést és kisebb ellenállással szűrhettek, ami védi a membránt is [161].

Ahmad és kollégái (2012) sikeresen sűrítettek be mikroalga szuszpenziót keresztáramú membránművelettel, mikroszűréssel. A vizsgálati eredmények szerint a kialakult szűrőlepeny ellenállása (R_c) - adott kondíciók mellett - nagyobb szerepet játszott a szűrési műveletben, mint a koncentrációs polarizáció miatti ellenállás (R_{CP}) és a pórusellenállás (R_b) [162].

Arkhangelsky és munkatársai (2012) tanulmányozták a membránszűrést gátló különböző szerves és szervetlen anyagokat, illetve azok hatását a membránok elszennyeződésére. A tapasztalataik azt mutatták, hogy a membránok elszennyeződése a különböző szerves és szervetlen anyagok szinergizáló hatásán múlik a rendszerben. A szennyezés mértékétől függetlenül, megfelelő dinamizmussal működő rendszer hatékonyan tudja kontrollálni a membránszennyezést, míg a felületöblítés képes visszaállítani a fluxust a membránra jellemző szintre. Emiatt a szennyezőanyag-szennyezőanyag illetve membrán-szennyezőanyag ionszintű interakciói nem voltak képesek irreverzibilis szennyezésre [158].

Zhang és kollégái (2012) cianobaktériumok és extracelluláris szerves anyagok okozta fouling vizsgálatát végezték ultraszűrő membránok esetében. Sűrítés közben kialakuló fluxuscsökkenés kiváltói azok a baktériumok, amelyek a membránon réteget kialakítva gátolják a szűrés folyamatát. Cianobaktériumok például szerves makromolekuláris lerakódásokat képeznek a membránon, fehérjék és poliszacharidok formájában, ezek pedig a membránmodul visszafordíthatatlan sérüléséhez vezetnek [163].

Rawat és munkatársai (2011) azt a megállapítást tették, hogy kisméretű algák kinyerése érdekében membránműveletet, mikro- vagy ultraszűrést célszerű alkalmazni, ami viszont költséges, mivel a membránt gyakran kell cserélni, az eltömődés, elszennyeződés miatt [132].

1.7.4.2. Mikroszűrés (MF)

Mikroszűréssel szuszpendált részecskéket, nagyobb részecskeméretű kolloidokat lehet visszatartani, míg a makromolekulák és az oldott anyagok áthaladnak az MF membránokon. Alkalmazásával eltávolíthatók sejtek, gombák, baktériumok, flokkulált anyagok.

Klasszikus szűrési művelet, melynél a szitahatás érvényesül, mechanikus leválasztás történik. A szétválasztás határértékét a pórusméret határozza meg, hajtóerőként pedig a transzmembrán nyomáskülönbség (Δp_m) a meghatározó tényező, ez általában 1 körüli érték.

Az egységnyi membránfelületen átáramlott permeátum átlagos sebességét (J), a fluxust, különösen azoknál az eseteknél, ahol kizárólag a szitahatás érvényesül, a Carman-féle szűrőegyenlettel írhatjuk le közelítőleg.

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p_m}{\eta(R_M + \alpha cV / A)} \quad (13)$$

ahol J a permeátum átlagos sebessége [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$], V a szűrlet mennyisége [m^3], A a membrán felülete [m^2], t idő [h], Δp_m a transzmembrán nyomáskülönbség, η a közeg dinamikai viszkozitása [$\text{Pa}\cdot\text{s}$], R_M a közegellenállás, α a fajlagos lepényellenállás, c a szuszpenzió koncentrációja [kg/m^3] [127, 128].

Turbulens áramlási tartományra pontosabb összefüggés az alábbi:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p_m}{\eta(R_M + a(V / A)^b)} \quad (14)$$

ahol a az eltömődési koefficiens, b az eltömődési hatványkitevő [127, 128].

A fenti közelítő összefüggések alapján a mikroszűrő membrán áteresztőképessége arányos a transzmembrán nyomáskülönbséggel.

1.7.4.3. Ultraszűrés (UF)

Az ultraszűrés molekuláris mérettartományban alkalmazható membránszeparációs eljárás. A visszatartást a pórusok és az oldott részecskék mérete és alakja határozza meg. Az ultraszűrő membránok már a kisebb mérettel jellemezhető molekulák (kolloidok, makromolekulák, sejttörmelékek, fehérjék, poliszaharidok) leválasztására is képesek [127, 128].

A hajtóerő itt is a membrán két oldala közötti nyomás különbsége. A membrán az oldószerre nézve átjárható, míg az oldott anyag molekuláinak csak egy kis része jut át. Így a betáplált oldat koncentrációja lényegesen nagyobb lehet a szűrlet koncentrációjánál. Az áteresztőképesség az alábbi összefüggéssel becsülhető meg.

$$J = K_M [(\Delta p_m) - (\pi_1 - \pi_2)] \quad (15)$$

ahol J a permeátum átlagos sebessége [$\text{dm}^3/\text{m}^2\text{nap}$], K_M a membrán permeabilitása, Δp_m a transzmembrán nyomáskülönbség, π_1 az oldat ozmózisnyomása a betáplálás oldalán, π_2 az oldat ozmózisnyomása a permeátum oldalán [128].

Az ultraszűrés transzmembrán nyomása általában 1 - 7 bar körüli érték. A fenti összefüggés alapján az áteresztőképesség az ultraszűrők esetén is arányos a transzmembrán nyomáskülönbséggel, a gyakorlatban azonban csak igen kis nyomáskülönbség értékeknél nő lineárisan. A nyomáskülönbség további növelésével az áteresztőképesség csak kisebb mértékben növekszik, sőt függetlenné is válhat. Az oldószer membránon keresztül való átáramlása miatt ugyanis a falnál megnövekedhet az oldat koncentrációja (koncentrációs polarizáció). Kolloidok, makromolekulák esetén egy ún. második membrán képződik az elsődleges membrán felszínén, amely jelentősen befolyásolhatja az anyagátadás sebességét. Ezekből következik, hogy mind az oldat tulajdonságai, mind az áramlási viszonyok, műveleti paraméterek igen jelentős tényezők az ultraszűrésnél [127, 128].

1.7.4.4. Mikroalga szuszpenziók besűrítése membránszűréssel

A kapcsolódó szakirodalmak alapján [152-176] mind a mikroszűrés, mind az ultraszűrés lehetséges alternatív eljárásokat jelentenek a mikroalgák kinyerésére a termesztő közegből. Külön előnye ezeknek a műveleteknek, hogy egyrészt kíméletes módszerek (az algasejtek megőrzik életképességüket, mozgékonyaságukat, a negatív felületi töltésüket), másrészt a mikroalgákon kívül a sejttörmelékeket, baktériumokat, kolloid anyagokat is képesek eltávolítani, visszatartani, a termesztő közegből [213].

A legnagyobb problémát egyrészt a membránok ára és elszennyeződése okozza, másrészt a művelet energiaigénye is nagy [214].

Két algafaj (*Haslea ostrearia* és *Skeletonema costatum*) besűrítésének vizsgálatára, különböző anyagú, pórusméretű mikroszűrő és ultraszűrő membránokat használtak az alább látható táblázatnak megfelelő, szakaszos, „hagyományos” keresztáramú membránszűrő berendezésben [214]. A vizsgált membránok anyaga és jellemzői az **5. és a 6. táblázatban** láthatóak.

5. táblázat Mikroszűrők

Membrán jele	Membrán anyaga	Átlagos pórusméret [μm]	Fluxus vízre, $\Delta p_m = 1 \text{ bar}$, [$\text{dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$]
6515	PVDF	1,5	6500
6508	PVDF	0,8	6000
6504	PVDF	0,4	5600
6502	PVDF	0,2	5100
6501	PVDF	0,1	4800

6. táblázat Ultraszűrők

Membrán jele	Membrán anyaga	Vágási érték (cut off) [D]	Fluxus vízre, $\Delta p_m = 1 \text{ bar}$, [$\text{dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$]
3038	PAN	40 000	600
3065	PVDF	40 000	350
3028	PES	30 000 / \approx 20 nm/	200

A mikroszűrők vizsgálatakor azt tapasztalták, hogy $\Delta p_m = 1 \text{ bar}$ érték mellett a kezdeti fluxus $600 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ értékről 1 órán belül $140 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ értékre csökken, a membrán pórusméretétől függetlenül a fluxus vs. idő tranziensgörbék szinte egybeesnek. 60 perc után a fluxus értékek állandósultak, és a következő 120 percben csak minimális mértékben csökkentek. Különösen drasztikus a fluxusok csökkenése, ha a vízre vonatkozó adatokhoz ($4800\text{-}6500 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$) viszonyítjuk [214].

- Irodalmi áttekintés -

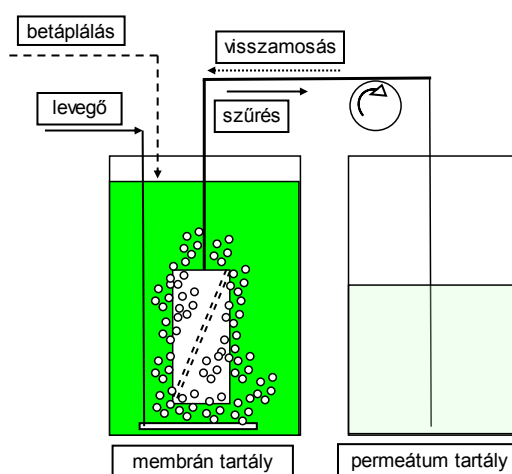
Az ultraszűrők vizsgálatokor is hasonló jellegű tranziensgörbék adódtak $\Delta p_m=1$ bar érték mellett. A fluxus értékek itt is 50 perc elteltével stabilizálódtak, de az állandósult érték jelentős mértékben függ a membrán anyagától és a cut-off értéktől. A PAN 40 kD-os membrán esetén $120 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ érték adódott, míg a PVDF 40 kD-os membrán esetén $60 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ érték, a PES 30 kD-os membrán esetén pedig közbülső, $90 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ értékek adódtak. Hosszabb idejű, 10 napos kísérletet végezve a PAN 40 kD-os és a PVDF 0,1 μm -es membrán alkalmazásával, $\Delta p_m = 1$ bar érték mellett. A 40x nagyobb pórusméretű mikroszűrő membrán csak az első 30 percben produkált nagyobb fluxust, 2 óra után a stabilizálódott fluxus értéke viszont kisebb, $50 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$, mint a PAN 40 kD-osra jellemző $60 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ érték. Végül a PAN 40 kD-os membránnal szerelt berendezés összekapcsolva üzemelt egy foto-bioreaktorral, amelyben *Haslea ostrearia* algát termesztettek. A berendezések folyamatosan működtek 6 héten keresztül. $\Delta p_m = 0,2$ bar transzmembrán nyomást állítottak be. Ilyen körülmények között 5 nap után $20 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$ értéken stabilizálódott a fluxus. Ezzel demonstrálták, hogy az ultraszűrés alkalmas hosszú időn keresztül, tisztítás nélkül is, folyamatos algakinyerésre a foto-bioreaktorból, a permeátum pedig visszavezethető és újrahasznosítható termeszítő közegként. A foto-bioreaktorból elvett algaszuszpenzió koncentrációját $50-550 \cdot 10^6$ sejt/ dm^3 mértékegységben adták meg [214].

A kísérleti eredményeik alapján egy $1 \text{ m}^3/\text{nap}$ permeátum áramra tervezett kisméretű ultraszűrő berendezés paramétereit, energia fogyasztását és beruházási költségét becsülték:

Permeátum áram:	$1 \text{ m}^3/\text{nap}$,
Térfogat sűrítési arány:	20,
Átlagos permeátum áram:	$40 \text{ dm}^3/\text{m}^2/\text{h}$,
Membrán felülete:	$1-2 \text{ m}^2$,
Működési ciklus:	20 óra működés, 4 óra tisztítás,
Membrán geometria:	kapilláris, vagy cső,
Átlagos membrán élettartam:	2 év,
Membrántisztítás:	2 \$/ hét,
Munkaerő szükséglet:	2-5 óra/hét,
Energia igény:	$3-10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ permeátum, a beállítástól függően,
Beruházási költség:	10 000-35 000 \$, anyagok és automatizálás,
Membrán ára:	a teljes költség 5-10 %-a.

- Irodalmi áttekintés -

Ha a foto-bioreaktorban termelt algaszuszpenzió koncentrációját 1 g alga/dm³-nek vesszük, akkor a berendezés naponta 1 kg algát produkál. A termék 50 dm³ sűrítmény 20 g alga/dm³ koncentrációval. Energiafogyasztása a legkedvezőbb esetben is 3 kWh, az 1 kg alga energiatartalmának a fele. A mikroalga szuszpenziók besűrítésére irányuló membránszűrő eljárások kutatásának, fejlesztésének egyik célja a művelet fajlagos energiaigényének csökkentése. Ezt a célt szolgálja, az ún. bemerülő membránokkal működő eljárások vizsgálata. A bemerülő membránokat (immersed system) alkalmazó bioreaktorokat az 1990-es évektől alkalmazzák ipari célokra, elsősorban szennyvízkezelés területén. A művelet vázlatát a **9. ábra** mutatja be.



9. ábra Membránszűrés bemerülő membránnal

Működésének lényege a következő: Az „immerziós” membrán a membrán tartályba töltött algaszuszpenzióba merül. A membránmodul alá vezetett levegőáram a gázelosztó segítségével durva buborékok formájában távozik, a buborékok tisztítják a membrán külső felületét és homogenizálják a szuszpenziót. A permeátumot szivattyúval távolítják el a membrán belső teréből. A transzmembrán nyomáskülönbséget (általában $\Delta p_m < 0,6$ bar) a permeátum szivattyú állítja elő a szűrési részperiódusban. A visszamosási részperiódusban permeátumot nyomnak a membrán belső terébe, ez a folyadékáram tisztítja a membrán külső felületét. A szűrési és a visszamosási periódusok meghatározott program (idők, térfogatáramok, nyomások) szerint ciklikusan ismétlődnek. A permeátumfluxus alakulását nagyon sok tényező, műveleti paraméter befolyásolja (a membrán anyaga, pórusmérete, geometriája, visszamoshatósága, az algaszuszpenzió jellemzői, levegőztetés, transzmembrán nyomás, térfogatsűrítés, stb.) [215].

- Irodalmi áttekintés -

De Baerdemaeker és munkatársai (2013) laboratóriumi tesztek eredményei alapján pilot méretű berendezést építettek 180 dm³-es membrántartállyal és 11 db nagyméretű membránpanellel. A levegőztetést 0,35 m³/m²/h fajlagos értéken rögzítették. Az eredményeik alapján 2 g alga/dm³ koncentrációjú *Nannochloropsis oculata* szuszpenzió besűrítése 10 g alga/dm³ koncentráció értékig, *IPC-UF* és *PVC-MF* membránnal a **7. táblázat** szerinti értékekkel lehetséges (biomassza kihozatala ~ 80 %) [215]. A kvázistacionárius állapotban is tartható átlagos permeátumfluxus értéke a fajlagos energiaigényt is befolyásolja (**7. táblázat**).

7. táblázat Besűrítés különböző membránok alkalmazásával [215]

Membrán	Átlagos permeátumfluxus [dm ³ /m ² /h]	Fajlagos energiaigény [kWh/kg]	Fajlagos energiaigények a kinyert alga energiatartalmára vonatkoztatva [%]
<i>IPC-UF</i>	28	0,169	2,83
<i>PVC-MF</i>	10	0,284	4,73

2-10 g alga/dm³ koncentrációig a fenti fluxusértékek mellett membránszűréssel, 10-200 g alga/dm³ koncentrációig pedig centrifugálással számoltak. A centrifugálás fajlagos energiaigényét 1 kWh/m³ értéknek vették (tányéros berendezés), így adódtak a fenti fajlagos energiaigények. Ha ezeket az értékeket a kinyert alga energiatartalmára (6 kWh/kg alga) vonatkoztatjuk, akkor ezek az értékek elfogadhatatlanul alacsonyak!

Vizsgálták továbbá a tányéros centrifugából kikerülő folyadék tisztítását mindkét típusú (*IPC-UF* és *PVC-MF*) membránnal. A fluxus hőmérsékletfüggő, 8 °C alatt el is dugul a membrán csapadékkiválás miatt. A permeátumot természetközlegként használták, de erre vonatkozó eredményeket nem közölnek [215].

Bilal és munkatársai (2012) hasonló rendszerben vizsgálták mikroalga szuszpenziók besűrítését különböző pórumméretű membránokon. Két algatípust termesztettek 30 dm³-es foto-bioreaktorokban, a membránszűrést a 7 napos szaporodási fázis után a stacionárius fázisba került szuszpenziókkal végezték. A vizsgált algafajok: *Chlorella vulgaris*, édesízi zöldalga, és *Phaeodactylum tricornutum*, tengeri diatoma. A szűrési vizsgálatokat 5 napon keresztül végezték, a feldolgozásra kerülő szuszpenziók koncentrációja a *Chlorella vulgaris* esetén: 0,41 ± 0,05 g/dm³, míg a *Phaeodactylum tricornutum* esetén: 0,23 ± 0,06 g/dm³ [216].

- Irodalmi áttekintés -

A koncentrációkat gravimetriásan határozták meg, Whatman üvegszálás szűrőt használtak, mosófolyadékként ammónium-karbonát oldatot alkalmaztak, a szárítást 105 °C-on végezték. Megállapították, hogy az algákból származó, extracelluláris, szerves anyagok (algogenic organic matter) a membrán eltömődését okozhatják, ez különösen az un. exopoliszaharidokra jellemző. A szűrési kísérletek előtt meghatározták a szuszpenziókban az exopoliszaharidok (EPS) koncentrációját kolorimetriás módszerrel. Az alábbi értékeket kapták: *Chlorella vulgaris* esetén: $12,7 \pm 0,7$ mg EPS/dm³, a *Phaeodactylum tricornutum* esetén: $13,4 \pm 1,0$ mg EPS/dm³ [216].

Az algaszuszpenzió betöményítését két fokozatban végezték, először 25 dm³ leszüretelt szuszpenziót besűrítettek 5 dm³-re, a térfogat sűrítési arány: 5, majd az 5 dm³ sűrítményt tovább sűrítették 1,67 dm³-re, a térfogat sűrítési arány: 3. Kísérleti eredményeiket a **8. táblázat** foglalja össze.

8. táblázat Bilad és munkatársai (2012) által mért eredmények összefoglalása [216]

Alga	Betáplálás	Koncentráció [g/dm ³]	Sűrítés		Kihozatal [%]		
			VF	CF	PVDF-9	PVDF-12	PVDF-15
<i>Chlorella vulgaris</i>	Kiindulási	0,4	-	-	98	98	98
	Sűrítmény1	1,8	5	4,50	92	82	98
	Sűrítmény2	3,5	3	1,90	99	99	100
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Kiindulási	0,2	-	-	70	77	90
	Sűrítmény1	0,7	5	3,50	93	99	99
	Sűrítmény2	2,0	3	2,86	99	99	98

Alga	Betáplálás	Konc. [g/dm ³]	Membrán	Fluxus [dm ³ /m ² /h]	Energiaigény	
					E _v [kWh/m ³]	E _w [kWh/kg]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Kiindulási	0,4	PVDF-9	38,3	0,27	0,64
	Sűrítmény1	1,8	PVDF-9	29,8	0,31	0,59
	Sűrítmény2	3,5	PVDF-9	17,0	0,48	1,10
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Kiindulási	0,2	PVDF-9	42,5	0,25	0,98
	Sűrítmény1	0,7	PVDF-12	29,8	0,31	1,32
	Sűrítmény2	2,0	PVDF-12	29,8	0,31	1,29

Szárazanyag veszteségre utal, ha a térfogatsűrítés (VF) és a koncentrációs faktorok (CF) között nagy a különbség, ezek az értékek a *Chlorella vulgaris* esetén: $(5 \times 3) = 15$ -ös VF-hez $(4,5 \times 1,9) = 8,55$ CF tartozik, így a szárazanyag kihozatala a két fokozatnak együttesen: $(8,55/15)100\% = 57,0\%$. *Phaeodactylum tricornutum* esetén: $(5 \times 3) = 15$ -ös VF-hez $(3,5 \times 2,86) = 10,87$ CF tartozik, így a szárazanyag kihozatala a két fokozatnak együttesen: $(10,87/15)100\% = 72,5\%$ [216].

Ezek az alacsony értékek részben abból adódhatnak, hogy a membránokon átmennek olyan szerves anyagok is, amelyek az analitikai szűrőn fennmaradnak.

- Irodalmi áttekintés -

A biomassza egy része felhalmozódhat a membrán felületén, mint az élő algasejtek működéséhez is szükséges szerves anyag (a saját tömegükből). Ugyanakkor az algára vonatkozó kihozatalokra, néhány beállítástól eltekintve, magas, 98-100 %-os értékek adódnak. A fluxusértékek a szuszpenzió koncentrációjának növekedésével csökkennek, különösen a *Chlorella vulgaris* alga esetén, 0,4 g/dm³-nél 38,3 dm³/m²/h, míg 3,5 g/dm³-nél már csak 17,0 dm³/m²/h [216]. A fajlagos energiaigény becsléséhez egy kommunális szennyvíztisztításra használt eleven-iszapos, bemerülő membránnal üzemelő berendezést vettek alapul. Ennek az ipari méretű változatnak (bioreaktor plusz membránszűrő) a fajlagos energiaigénye 0,64 kWh/m³ permeátum. Külön csak a membránszűrő rész energiaigénye 0,4 kWh/m³ permeátum. Ez az alábbiakból tevődik össze 1 m³ permeátum térfogatra vonatkoztatva: folyadék betáplálás szivattyúval ($P_{in}=0,03$ kWh/m³), permeátum szivattyúzás ($P_p=0,07$ kWh/m³), durva buborékos levegőztetés ($L_B=0,23$ kWh/m³), tisztítás ($CIP=0,04$ kWh/m³), levegő komprimálása ($L_k=0,02$ kWh/m³). Az összesített energiaigény 0,39 kWh/m³-nek adódik [216].

A folyadékszivattyúzásra vonatkozó fajlagosokat (P_{in} , P_p) meghagyták, a többit pedig a membránfelülettel arányosan változtatták. Az üzemi berendezésben a permeátumfluxus értéke $J_{ref}= 22$ dm³/m²/h. A mikroalga szuszpenzió besűrítésére vonatkozó fajlagos energiaigény becsléséhez az alábbi összefüggéseket használták:

$$r_A = \frac{A_M}{A_{ref}} = \frac{J_{ref}}{J_M} \quad (16)$$

$$E_W = \frac{E_V Y_{cf}}{c_M} \quad (17)$$

$$E_V = P_{in} + P_p + r_A (L_B + CIP + L_k) \quad (18)$$

ahol r_A felületarány, A_M a mikroalga sűrítéséhez szükséges felület, A_{ref} a referencia berendezésben levő felület, J_{ref} a fluxus értéke a referencia berendezésben, J_M a fluxus értéke a mikroalga sűrítésnél, E_V becsült energiaigény a permeátum térfogatra [kWh/m³], E_W becsült energiaigény száraz alगतömegre [kWh/kg], Y_{cf} a művelet biomassza kihozatala, c_M a feldolgozásra kerülő alga szuszpenzió koncentrációja [kg/m³] [216].

A permeátum térfogategységére vonatkoztatott energiaigénye a fluxustól függ, míg az alga tömegegységére vonatkoztatott adat a szuszpenzió koncentrációjától is. Ezek már sokkal realisztikusabb adatok.

A legalacsonyabb értékek: *Chlorella vulgaris* esetén 0,27 kWh/m³ permeátum, ill. 0,64 kWh/kg száraz alga, *Phaeodactylum tricornutum* esetén pedig 0,25 kWh/m³ permeátum, ill. 0,98 kWh/kg száraz alga [216].

A sűrítmény szuszpenziókat centrifugálással sűrítették tovább 220 g alga/dm³ értékre. Ehhez a művelethez egy nagy fajlagos energiaigényű (8 kWh/m³) centrifugát választottak. Ha közvetlenül centrifugálnák a szuszpenziókat, akkor a besűrítés energiaigénye: 8 kWh/m³ lenne, és a művelet eredménye *Chlorella vulgaris* esetén 400 g száraz algát tartalmazó massa, amiben az alga energiatartalma 2,4 kWh. *Phaeodactylum tricornutum* esetén 200 g száraz algát tartalmazó massa, amiben az alga energiatartalma már csak 1,2 kWh. Az energiamérleg nagyon-nagyon negatív (alga energiatartalma 6 kWh/kg) [216]!

Abban az esetben, ha a sűrítmény szuszpenziókat centrifugáljuk, sokkal kedvezőbb fajlagos értékeket kapunk: 1 m³ szuszpenziót membránnal sűrítünk $VF = 15$ értékig, a sűrítmény térfogata így: $1 \text{ m}^3 / 15 = 0,067 \text{ m}^3$. Ezt centrifugáljuk, az energiaigénye: $0,067 \text{ m}^3 \times 8 \text{ kWh/m}^3 = 0,53 \text{ kWh}$. A közlemény szerint a kombinált művelet (membránszűrés + centrifugálás) energiaigénye 220 g alga/dm³ sűrűségű alga-paszta előállításához, azaz *Chlorella vulgaris* esetén 0,84 kWh/m³ eredeti szuszpenzió, és *Phaeodactylum tricornutum* esetén 0,91 kWh/m³ eredeti szuszpenzió [216].

Ha a membránszűrés alacsony kihozatali értékeitől (57 % ill. 72.5%) eltekintünk, akkor 1 kg száraz algára vonatkoztatott energiaigény 220 g alga/dm³ sűrűségű alga-paszta előállításához *Chlorella vulgaris* esetén $((0,84 \text{ kWh/m}^3) / (0,4 \text{ kg/m}^3)) = 2,10 \text{ kWh/kg}$ száraz alga, míg *Phaeodactylum tricornutum* esetén $((0,91 \text{ kWh/m}^3) / (0,2 \text{ kg/m}^3)) = 4,55 \text{ kWh/kg}$ száraz alga értékek adódnak [216]. Ebben az esetben az energiamérlegünk már pozitív.

Általánosságban elmondható, hogy a membránszűrések nagyon dinamikusán fejlődő szeparációs műveletek. Jelenleg algák tömegtermesztésére szolgáló technológiákban főleg a kisebb térfogatú (< 2 m³/nap) szuszpenziók költséghatékony sűrítésére javasolják, nagyobb térfogatok (> 20 m³/nap) esetén gazdaságosabbnak tűnik a centrifugálás [196].

1.8. A mikroalgák felhasználása

A mikroalgák bolygónk oxigén készletének 90 %-át termelik, azaz kilencszer többet, mint az összes többi növény együttesen. Tevékenységüknek köszönhetően jelentős mértékben hozzájárulnak a légkör oxigéntartalmának kialakításához.

Felhasználási területük igen széleskörű. Az algákat alkalmazzák a mezőgazdaságban, leggyakrabban biotrágyaként és talajkondicionálóként, de az utóbbi időben növekszik az érdeklődés antimikrobiális- és a növényi növekedést szabályozó, úgynevezett *PGR*-anyagaik iránt is. Számos hasznos tulajdonságukkal és kedvező hatásukkal befolyásolják a növény-talajrendszereket.

Az algák olyan speciális anyagokat tartalmaznak, amelyeknek igen nagy a kereskedelmi értéke. Ilyenek például a hosszú szénláncú, többszörösen telítetlen zsírsavak (eikozapentaén-sav: *EPA*, dokozahexaén-sav: *DHA*) és a karotinok. Létezik néhány cég, amely ezen anyagokat mikroalgákból állítja elő, így ez egy olyan lehetőség, amely rövidtávon beinduló ipari termelés lehetőségét kínálja.

A mikroalgák egyedülálló és érdekes biokémiai tulajdonságokkal rendelkeznek, melyek több szempontból is egyre fontosabb szerepet játszanak a mindennapokban, a táplálkozástól egészen az energiatermelésig [120].

1.8.1. A jövő építészete

Az algatechnológiának egy speciális, futurisztikus lehetősége az épületgépészeti hasznosítása. A neves Arup tervezőiroda kutatóközpontja szerint a jövő épületei alkalmazkodnak a benne dolgozók és élők igényeihez. A Pompidou Centre, a Sydney Operaház és a pekingi olimpia egyes stadionjainak terveiért felelős Arup tervezőiroda belső kutatóközpontjának elképzelései szerint a jövő felhőkarcolóit algák látják majd el energiával, az épület pedig alkalmazkodik a felhasználóhoz. Josef Hargrave, az Arup „It's Alive” című tanulmányának szerzője szerint az ilyen típusú épületek alkalmazkodni képesek organismusokká válnak, amelyek ételmezt is adnak, sőt, a víz és a levegő tisztításából is kiveszik részüket. A Hargrave által 2050-re elképzelt sokemeletes házak egyes szintjein veteményesek virágoznak majd, az épület színe az UV-sugárzás mértékétől függően változik, egyes elemei pedig akár kiemelhetők és cserélhetők is lehetnek [121].

1.8.2. Emberi táplálék

A maják és az aztékok, a mai Közép- és Dél-Amerika ősi, fejlett civilizációi táplálékforrásként már évezredekkel ezelőtt ismerték és fogyasztották az algakészítményeket gyógyító, valamint tápláló tulajdonságaik miatt. A 20. század végén olyan tudósok, mint a japán Hiroshi Nakamura és az Egyesült Államok-beli Christopher Hills munkája nyomán a spirulinával kapcsolatos kutatómunka hatalmas lendületet vett. A kutatások eredményei bebizonyították (amit évezredekkel ezelőtti őseink ösztönösen tudtak), hogy a *Spirulina* egyike a legjobb minőségű, nem állati eredetű fehérjeforrásoknak, mely a Föld élelmezésének jelentős részét képezhetné. A dél-amerikai és az ázsiai országokban régóta fogyasztják preventív és terápiás céllal. Európában még csak az elmúlt évtizedekben terjedt el igazán a köztudatban az algafogyasztás fontossága. Azokon a területeken ahol az alga a táplálkozás szerves részét képezi, az emberek kitűnő egészségnek örvendenek.

Ma az algákat a világ legnagyobb élelmiszer tartalékkaként tartják számon a tápanyagsűrűségük miatt. Két fajtájuk áll különösen érdeklődés középpontjában: a *Spirulina* és a *Chlorella*.

A mikroalgák színyagai akár ételek természetes színezékeként is felhasználhatóak, akár funkcionális élelmiszerek létrehozásában is. A *Chlorella* klorofiltartalma kiemelkedő a növények közül, így jó forrása lehet a zöld színyagnak [122].

1.8.3. Kozmetikai ipar

Egyes fajok (pl.: *Chlorella vulgaris*) rendelkeznek azzal a tulajdonsággal, hogy a környezetszennyező anyagokat és nehézfémeket megkötik. Ezen tulajdonságaik miatt használatuk elterjedt a fogászatban (az amalgám fogtömések eltávolításánál). Az algákat hosszú ideje alkalmazzák kozmetikai készítményekben illetve szájon át kozmetikai célokra is, mivel koncentráltan tartalmazhatnak különféle bioaktív anyagokat.

A *Spirulinából* készült termékekben a karotinoid vegyületek és más színyanyagok, illetve az E-vitamin antioxidáns, oxidatív stresszt kivédő hatását használják fel, ami elméletileg tovább fokozható, ha az algákat bizonyos nyomelemekben gazdag környezetben tenyésztik.

A klorofill fertőtlenítő hatását hosszú idő óta ismerjük. Szappanokban, borotválkozókrémekben, fogkrémekben ma már nagyobb boltok polcán gyakran megtalálhatjuk a klorofill-tartalmú termékeket.

1.8.4. Mezőgazdasági hasznosítás

Az algák mezőgazdasági hasznosításával a világ számos pontján foglalkoznak a kutatók, vizsgálják például a növénypatogénekre gyakorolt hatást. A növények növekedésének, fejlődésének szabályozását a növényi hormonok végzik, ugyanilyen hormonokat termelnek az algák is. Az alga használható a termés minőségének, hozamának javítására, másodsorban pedig növényvédelmi célra. Ennek egyik módja, hogy az algát kijuttatják a kultúrnövényre, és az általa termelt anyagok úgynevezett elicitorként hatnak, tehát magában a növényben váltanak ki olyan élettani folyamatokat, amelyek következtében kevésbé lesz fogékony a betegségekre. A másik módja, hogy az alga közvetlenül hat a gombára, gátolja a szaporodását vagy elpusztítja, és így védi meg a növényt. Az alga tehát növényi tápanyag, növényvédő szer és talajjavító is [123].

Az algák növénytámogató hatásában szerepet játszik még mikroelem, makroelem, fehérje és zsírsav tartalmuk is.

1.8.5. Biopolimer-ipar

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 és 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 bio-üzemanyagok gyártása 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 [124].

Több műanyagtípus előállításában az alga, mint alapanyag használható fel.

Hibrid műanyagokhoz denaturált alga-biomasszát adagolnak töltőanyagként. Cellulóz-alapú műanyagok gyártásában azok az algaörzsek alkalmazhatóak hatékonyan, melyek extrakciója után a kinyert algaolaj legalább 30 %-ban tartalmaz cellulózt. Politejsav (PLA) monomerje legegyszerűbben az alga-biomassza fermentációjával állítható elő. A bio-polietilén előállításához használt monomer, az etilén, legegyszerűbben etanolból állítható elő. Etanol pedig kinyerhető az algából közvetlenül vagy az alga-biomassza bomlasztása után [124].

1.8.6. Bioenergetika

Új irány az ipari, energetikai szektorban történő felhasználás. Az algák a fényenergiát és a szén-dioxidot a szárazföldi növényekhez képest többszörös hatékonysággal alakítják át kémiai energiává. A zöld vegetáció a Nap hasznosítható sugárzó energiájának kb. 1 %-át hasznosítja. Átlagosan a fotoautotróf szervezetek a rendelkezésükre álló napsugárzás energiájának alig 0,5 %-át építik be a szervezetükbe. Az algák fényhasznosításának mértéke eléri az 5-7 % -ot, szemben a trópusi eredetű C4 széndioxid fixációra képes természetű növények (kukorica, cukornád) 1-2 % körüli, valamint a mérsékelt égövi C3 széndioxid megkötésű növények (pl. gabonafélék) 0,1-1 %-os fotoszintézis hasznosításához képest. Az így termelt alga-biomasszát közvetlenül megújuló energia forrásként, vagy olaj-, keményítő-, illetve cukor-tartalmát közvetve – biogáz-termelés adalékanyagként, vagy bio-üzemanyag előállítására – lehet hasznosítani.

Gendy és El-Temtamy (2013) az algatechnológia létjogosultságát, az ipari igényekhez igazodva tartják elképzelhetőnek. A technológia életképességét a feldolgozásban történő technikai újítások jelenthetik. A kinyerhető értékes komponensek, különféle feldolgozó technológiák kombinációjának alkalmazásával egy teljes(ebb) spektrumú (termék) hasznosítást tenne lehetővé, kiemelt figyelemmel a bioüzemanyag és energetikai célú hasznosításra [20].

Jonker és Faaij (2013) a mikroalgáknak, mint megújuló energiaforrásnak a gazdasági lehetőségét vizsgálják, és jól szemléltetik a bioenergia-termelés mikroalga alapú irányát. Oly módon tisztázzák a mikroalgák energetikai célú felhasználásának lehetőségét, hogy összevetik a termesztés és az elválasztás költségét, ill. energiaigényét, a megtermelhető bioenergiával [58].

Különböző éghajlati öveken becsülték a mikroalga termelékenységet, mind nyitott, mind pedig zárt tenyésztérendszerekben. Arra a megállapításra jutottak, hogy a technológia életképessége érdekében célszerű lenne az egyéb értékes komponensek kinyerése is [58].

A megtermelt alga-biomassza és feldolgozási hulladékaik a biogáz-üzemek hatékonyságának növeléséhez és a ténylegesen nulla CO₂-kibocsátás megvalósításához is előnyösen alkalmazhatóak.

A biogáz szétválasztásával, valamint gázmotoros vagy kazános elégetésével nyert CO₂-ot felhasználva a mikroalga-termékek mellett igen nagy metán-kihozatalú alapanyag képződik. Ez növeli az egyéb alapanyagok lebontási sebességét, így rövidül a tartózkodási idő a fermentorban, csökkenthető az üzemméret az új üzemeknél, a meglévőeknél pedig a kapacitáskihasználás és a hatékonyság növelhető. A gáztermelés intenzívebbé válásával a biogázüzemek megtérülési ideje harmadára mérsékelhető [58].

Az EnAlgae (Energetic Algae) új EU-projektekben Északnyugat-Európában, az algára alapozott biomassza-termelés előmozdítása céljából, 19 partner vesz részt – 14 millió eurós támogatás mellett [125]. Az EnAlgae projekt egyik fő célja a CO₂-légszennyezés csökkentése, és természetesen, az alga-biomassza minél hatékonyabb energetikai célra való felhasználása. Az algákból történő bioenergia-termelés mindezek miatt stratégiai prioritást élvez [125]. A német partnerek a mikro- és makroalgákkal dolgozva különböző termesztési eljárások lehetőségeit vizsgálják abból a célból, hogy miként lehet ökológiai, ökonómiai és szociális szempontból a legelőnyösebb folyamatláncokat kialakítani és a termesztéshez megfelelő „termőhelyeket” találni.

Az elmúlt években a fosszilis energiahordozók egyre költségesebb kitermelhetősége miatt folyamatosan nő az alternatív üzemanyagok (például a bio-üzemanyagok) felhasználásának igénye. A biodízel az olajnövényeken kívül jó hatásfokkal állítható elő nagy lipidtartalmú mikroalgákból is.

Daroch és munkatársai (2013) szerint az algából készíthető bio-üzemanyagok a globális felmelegedésre és klímaváltozásra adható egyik legígéretesebb megoldásnak tűnnek [21].

Kirrolia és munkatársai (2013) összehasonlították a mikroalgából nyerhető biodízelt a kőolajalapú biodízellel. Biodízel keverőkomponensként használták az algából kinyert lipideket (20 % biodízel - 80 % dízel), és a káros anyag kibocsátását vetették össze a biodízel emissziós értékeivel, ami pozitív mérleget mutatott.

- Irodalmi áttekintés -

Tanulmányuk az algatermesztéstől, a kinyert lipidek átalakításáig, biodízelgyártásig átfogóan foglalkozik az algatechnológiával [11].

Leite és munkatársai (2013) a termesztés technológiáját, valamint az elválasztás és feldolgozás azon lépéseit emelik ki, amelyek fejlesztésre szorulnak. Annak érdekében, hogy az algatechnológiai életképessé váljék, és gazdaságosan alkalmazható legyen [22].

Az algatechnológia életképessége nagyban függ a kőolaj árak, és az üzemanyag árak jövőbeni alakulásától [22].

2. Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok

2.1. Vizsgált algafajok

Az MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztálya az alábbi négy zöldalga törzset adta át termesztésre: *Chlorella vulgaris beij.* (0-jelű törzs), *Chlorella vulgaris* (17-jelű törzs), *Scenedesmus acutus meyen* (31-jelű törzs) és *Scenedesmus armatus chodat* (59-jelű törzs). Ezek közül kettő azonos fajhoz, a *Chlorella vulgaris*-hoz tartozik, amely felszíni vizeinkben mindenütt közönséges szervezet. Meg kell jegyezni, hogy a *Chlorella* nemzetség fajainak mikroszkópi vizsgálattal történő azonosítása nem biztonságos. Molekuláris genetikai vizsgálatok alapján az egy *Chlorella* fajhoz tartozó egyedek nem feltétlen jelentenek azonosságot, ezért az azonos néven futó törzsek eltérő genetikai és ezért fiziológiai adottságú szervezeteket jelenthetnek.

2.1.1. *Chlorella vulgaris beij.* (0-jelű törzs)

4-9 µm átmérőjű gömb alakú sejtek aggregátumokban jelennek meg a termesztés során (**F9. függelék**). Az aggregátum képződés előnyt jelenthet a sejtek természetfolyadékból való eltávolításánál, ugyanakkor az aggregátum képződés a sejtek idő előtti kiülepedését is okozhatja a természettedényben. A nem nitrogénéhezett flórában nílusvörös (Nile red) festéssel nem sikerült olajcseppeket kimutatni fluoreszcens mikroszkópban.

2.1.2. *Chlorella vulgaris* (17-jelű törzs)

4-9 µm átmérőjű gömb alakú magányos sejtek (**F10. függelék**). A nem nitrogén-éhezett tenyészetben nílusvörös (Nile red) festéssel sikerült olajcseppeket kimutatni fluoreszcens mikroszkóp segítségével. A sejtek mintegy egy-tizede - ~ 50 %-ban - sárga színnel fluoreszkált, ami nagyon biztató abban a tekintetben, hogy a későbbi nitrogén éhezés hatására jelentős lehet a lipid termelése a törzsnek (**F11. függelék**).

2.1.3. *Scenedesmus acutus meyen* (31-jelű törzs)

A sejtek hossza 14 μm , átmérője 5 μm körüli, felszíni vizeinkben elterjedt és gyakori szervezet. A természetben a négysejtű alakok a tipikusak, a gyorsan szaporodó tenyészetben az egy-két sejtű formák voltak a jellemzőek (**F12. függelék**). Nílusvörös festéssel nem sikerült számottevő lipidet kimutatni még a nitrogén éhezett sejtekben sem.

2.1.4. *Scenedesmus armatus chodat* (59-jelű törzs)

A sejtek hossza 10 μm , átmérője 4-5 μm körüli. A taxon 2-4-8 sejtű cönóbiomokat képez, felszíni édes és félsós vizekben elterjedt és gyakori (**F13. függelék**). Nílusvörös festéssel nem sikerült számottevő lipidet kimutatni még a nitrogén éhezett sejtekben sem.

2.2. Kémiai flokkulációs kísérletek analitikája

2.2.1. Abszorbancia spektrum mérése

Természetes vagy mesterséges megvilágítással üzemelő, reaktorainkban nagyon fontos a biotartalom egzakt módon való meghatározása. A számszerűsítéshez spektrofotométerrel (Metertech – SP8001 Spectrophotometert használtam) való abszorbancia spektrum felvétele szükséges. Az abszorbancia spektrum a fény hullámhosszának függvényében ábrázolva ad tájékoztatást a szuszpenzió alga koncentrációjáról és a kultúra állapotáról. A legfontosabb a 681,5 nm-nél kapott csúcs, ami a klorofill fényelnyelését mutatja. Ezekből a fényelnyelési spektrumokból az eltelt idő függvényében olyan grafikon vehető fel, mely a reaktor algatartalmának növekedését mutatja a tenyészciklus alatt, indulástól a szüretig (szaporodási görbe).

A abszorbanciaspektrum felvételével a sűrítés alakulása is nyomon követhető, a sűrítés közben levett minták vizsgálatával.

2.2.2. Szárazanyag-tartalom meghatározása

Az egyes algaszuszpenziók, illetve sűrítés közbeni minták szárazanyag-tartalmának vizsgálata szintén értékes adatokkal szolgál a sűrítési műveletről.

A módszer lényege, hogy a készülékem (KERN-típusú szárazanyag-tartalom-mérő berendezés) mérleg szerkezetére algaszuszpenziót mérek, majd azt öt percig 50 °C-on, öt percig 100 °C-on végül 120 °C-on történő tömegállandóságig (50 mg tömegcsökkenés/s) tartó atmoszférikus szárítással meghatározom a száraz anyag/nedvesség-tartalom értéket.

Ezzel a méréssel az algatartalom mellett a különböző sók és az algák szerves anyagcsere-termékei (melyek nem bomlottak el 120 °C-on) is megjelennek, mint maradványtömeg. Ezért ez a mérés a reaktorok vagy a leszedett (szüretelt) szuszpenziók közvetlen mintáinál csak tájékoztató jellegű adattal szolgál. A besűrített és desztillált vízzel átmosott algamintáknál végzett szárazanyag-tartalom-méréseknél azonban jó közelítéssel csak az alga száraz tömegét adja. Az adott mérési módszer jól alkalmazható volt a membránseparációs kísérleteimnél, mint a permeátum (anyagcsere termékek, maradványsók), mint pedig a sűrítmény (algasejtek) vizsgálatát illetően.

2.2.3. Részecsketöltöttség mérése (PCD)

A vizes szuszpenziókban kolloidálisan oldott részecskék, algák elektromos töltést hordoznak, ha a részecskék felületén disszociációra képes funkciós csoportok vannak. Ha elválasztjuk az ellenionokat a részecskéktől, áramlási potenciált mérhetünk (mV). A töltésmennyiség megállapítására egy polielektrolitos titrálást hajtottam végre, amelynél az áramlási potenciált (= 0 mV) a végpont meghatározására használtam. A mintához egy ellenkező töltésű polielektrolitot (Poli-diallil-dimetil-ammonium-klorid /Poly-DADMAC/), mint titrálószerrel adtam, amelynek töltéssűrűsége ismert.

- Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok -

A műszer méri a titráláshoz fogyott titrálószer mennyiségét, amiből az alábbi számítással kapom meg a fajlagos töltéssűrűséget (q [$\mu\text{eq/g}$]):

$$q = \frac{V_t c_t 1000}{w} \quad (19)$$

ahol V_t a felhasznált titráló oldat térfogata [cm^3], c_t a titrálóanyag normalitása [eq/dm^3], w a beadott minta szilárdanyag-tartalma [g], 1000 a töltéssűrűség átszámítási faktora.

Ha a [$\mu\text{eq/g}$] egységben megadott fajlagos töltésmennyiséget a Faraday-állandóval ($F= 96485 \text{ C/eq}$) megszorozzuk, megkapjuk az összes töltésmennyiséget [C/g] egységekben. Ha több azonos mintát hasonlítunk össze, nem feltétlenül kell a q töltésmennyiséget kiszámítani. Ha a mintákat mindig azonos körülmények között titráljuk, azaz ha a minta szilárdanyag-tartalma (alga-tartalom) és a titrálószer koncentrációja változatlan marad, tekinthetjük a felhasznált titrálószer [cm^3]-ben megadott térfogatát is eredménynek. Ezek az értékek így már egymás között közvetlenül összehasonlíthatóak. Itt a minta anionos illetve kationos fogyasztásáról beszélhetünk.

A flokkulálószer ülepítő hatását a *PCD* mérések eredményei alapján tudtam számszerűen követni és a derítési kísérletek irányát definiálni. (Itt szükséges megjegyezni, hogy a potenciál nagysága gyakran csak nehezen reprodukálható, mivel ez különböző, külső faktoroktól is függ /hőmérséklet, molekulatömeg, részecskeméret, stb./.) A kapott eredmények kiértékelését is nagyban megnehezítik a fent leírtak.

A *PCD* mérések során egy arany elektródokkal ellátott műanyag tartályba bemértem az ismert szárazanyag-tartalmú algaszuszpenziót, majd áramkörbe kötöttem a tartályban lévő oldatot, és egy dugattyúval áramoltatni kezdtem a szuszpenziót. A tiszta szuszpenzióban keverés hatására beálló feszültségegyensúlyra automatikusan megkezdődik a *Poly-DADMAC*-kel való titrálás. Végül, ha az egyensúly beállt 0 mV -nál, a műszer megadja a *Poly-DADMAC*-fogyást, a feszültségesést és megrajzolja a titrálási görbét. A mérőműszer az **F14. függelékben** látható.

PCD mérésekből levonható tapasztalataim a teljesség igénye nélkül a következők voltak:

1. Az esetek nagy részében algafajra és/vagy szuszpenzió-életciklusra jellemző a titrálógörbe lefutása,
2. a fajlagos töltésmennyiség a szaporodási fázis (életciklus) függvényében változik,
3. pH növelésével csökken a fajlagos töltésmennyiség,
4. az idő elteltével némileg csökken a fajlagos töltésmennyiség.

2.2.4. Vezetőképesség mérés

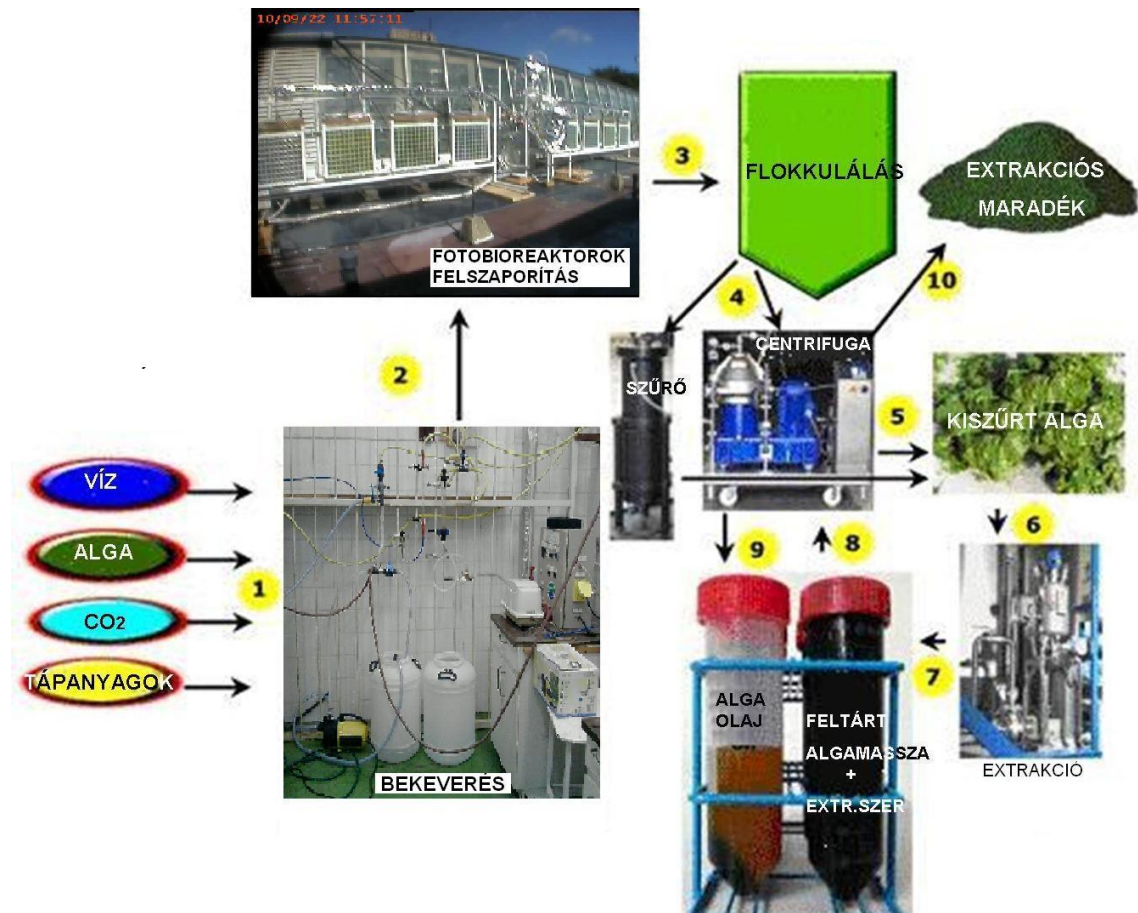
Membránszeparációs műveletnél a filtrátum monitorozásához egy Mettler Toledo-típusú konduktométert használtam, így az oldat vezetőképességéből lehetett következtetni a filtrátumban oldott sók koncentrációjára, vagyis közvetve a sűrítmény sótartalmára, valamint az elválasztott tápközeg, permeátum sótartalmára is. A mérés alkalmas volt a flokkulációs kísérletek utáni, tisztítási vizsgálatokra is. A szuszpenziótól elválasztott biomasszában maradt sók eltávolítását (le mosását) számszerűen követhetővé tette.

A fentiekén túlmenően a leválasztott szuszpenzió termesztésbe való visszaforgathatóságának vizsgálatában is nagy segítséget nyújtott, a mérés egyszerűsége és gyorsasága révén.

2.3. Kísérleti berendezések (tervezése és kivitelezése)

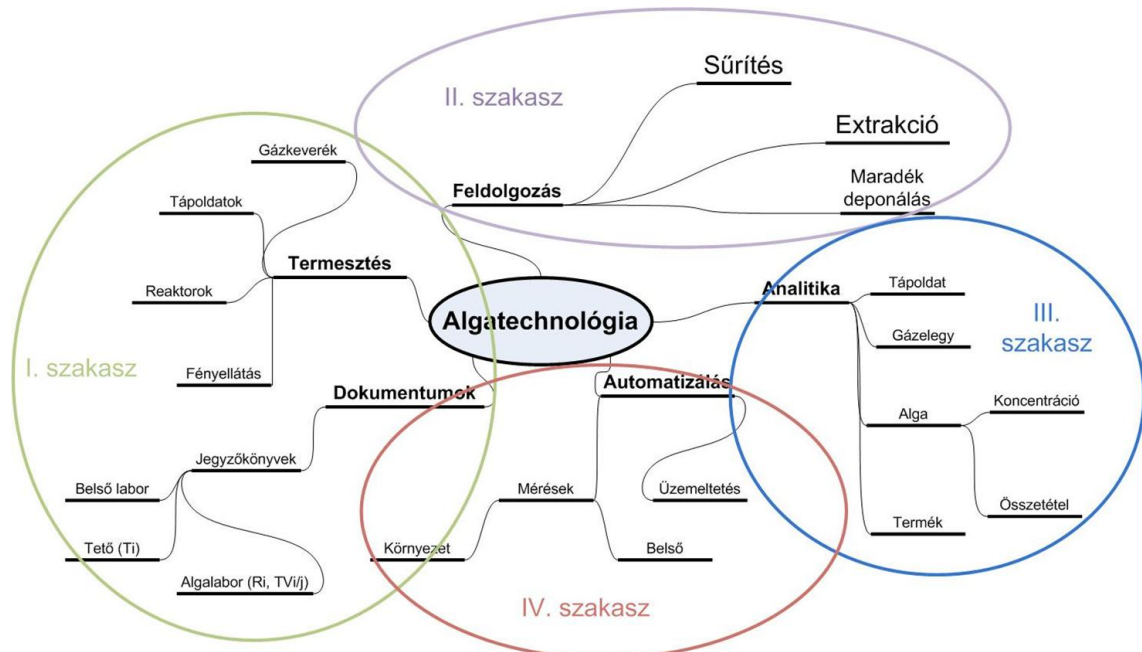
Bár a technológia műveletsora nem képezi szerves részét jelen értekezésnek, mégis szükségesnek tartom a műveleti sor, illetve az általam megtervezett, kiépített és üzemeltetett rendszer rövid ismertetését, amely sűrítési kísérleteimhez szolgáltatja a szükséges mennyiségű mikroalga-szuszpenziót.

A technológia műveletsora az **10. ábrán** látható, a teljesség igénye nélkül a következő lépésekből áll össze: tápoldat bekeverése, majd beoltása a kiválasztott algafajjal, foto-bioreaktorban történő felszaporítás, majd az algaelegy lecsapolását (algaszüretelés) követően a szeparációs műveletek, amelyek során az algát elválasztjuk a tápoldatától (besűrítés, szűrés). A leszűrt algát szárítani, aprítani kell és az így kapott vízmentes, aprított algatömeg kerülhet további feldolgozásra (pl.: extrakció).



10. ábra Algatechnológia műveletsora

A Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszékén a műveletsor minden egyes lépése külön-külön is kutatások tárgyát képezi, ezt mutatja a **11. ábra**.



11. ábra A Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszékén folyó algatechnológiai kutatások különböző területei, szakaszai

Az adott kutatási részekben, szegmenseken dolgozó szakemberek között nélkülözhetetlen a folyamatos kommunikáció és az algatechnológia teljes vertikumának bizonyos szintű ismerete, hiszen az egy ponton történő beavatkozás térben és időben egyaránt kifejti hatását az egész technológiára.

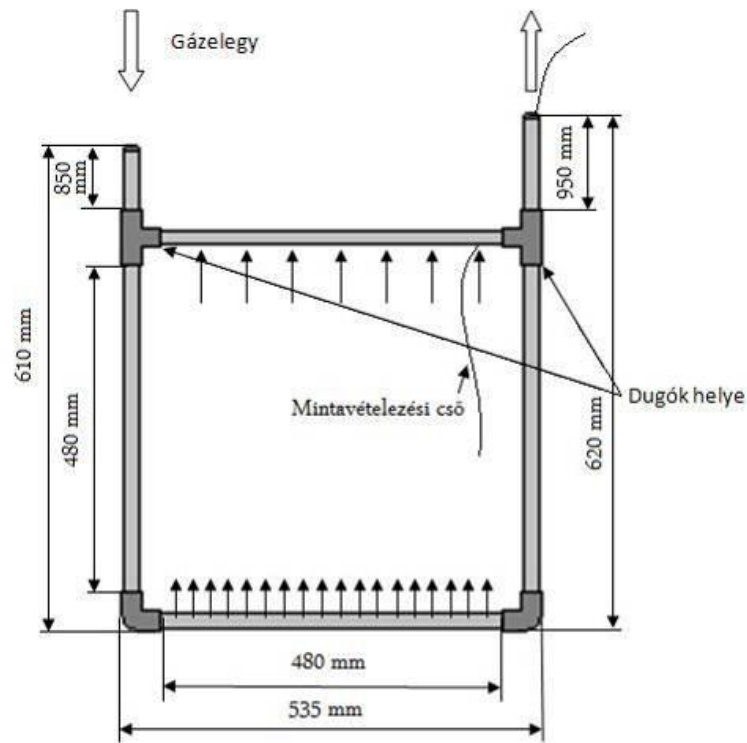
2.3.1. A laboratóriumi termesztési kísérletekhez kialakított fotobioreaktor és annak egységei

Ebben a fejezetben, részleteiben mutatom be a reaktor (*R*) egységeinek kialakítását. A későbbi reaktorkialakítások hasonló sémát követve épültek meg, illetve alapul szolgáltak a pilot méretű reaktorok tervezéséhez, megépítéséhez.

Bár jelen dolgozat nem tartalmaz közvetlen adatokat a reaktorok működési paramétereit illetően (de azon túlmenően, hogy a szeparációs kísérletekhez szolgáltatva a kellő mennyiségű algaszuszpenziót) lehetőség nyílt a membránszeparációnál keletkező permeátum visszaforgathatóságának vizsgálatára és egyéb, speciális szeparációs előkísérletek elvégzésére is (lásd 3.3.2. Széndioxiddal történő „fojtás” című fejezetben elvégzett kísérlet).

2.3.1.1. A reaktor belső keretének kialakítása

A reaktorteret egy erre a célra kiválasztott (550 x 1150 mm nagyságú, 0,1 μm falvastagságú, víztiszta anyagú) polietilén zsák képezi, amely egy speciálisan kialakított PVC anyagú csőkeretre van „felrögzítve”. Ez a belső csőkeret (**12. ábra**) szolgál az input, output áramok kapcsolódási pontjául (gázcsere), valamint a mintavételezési és anyagmozgatási cső is ezen keret output részébe van beépítve.

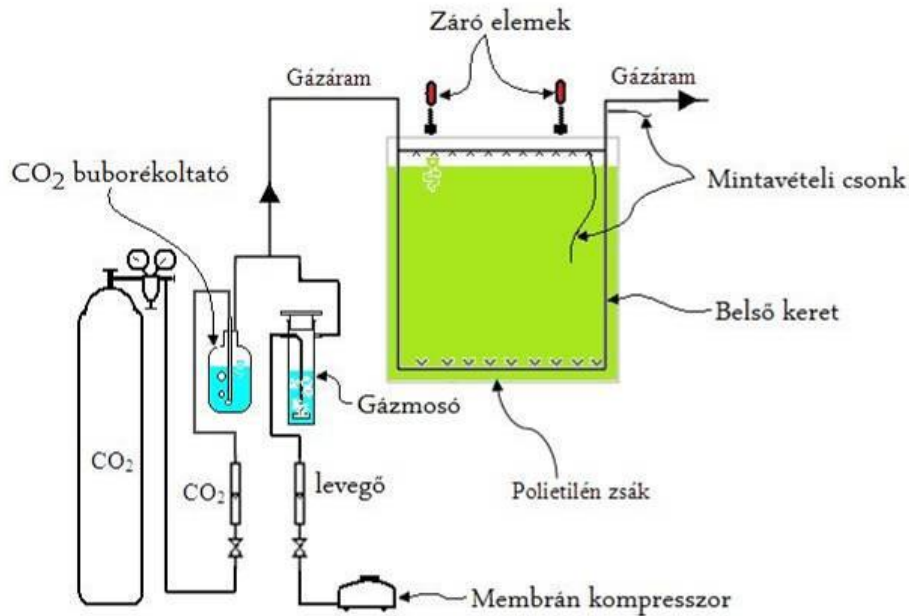


12. ábra Belső csőkeret

A keret alsó részén egymástól 5 mm távolságra lévő, 1,5 mm-es furatok teszik lehetővé a gázkeverék bevezetését, ill. porlasztását. Mindez egyben az elegy keverésére is szolgál, valamint a gázkeverék algaszuszpenzióval történő érintkezésének intenzifikálását is elősegíti. A gázkivezetésre szolgáló furatok 3,2 mm-esek és a keret felső részén egymástól 30 mm-es távolságban helyezkednek el. Az egyik ilyen szélső furaton lép be a mintavételezési cső is a reaktortérbe. A belső keret input ágán kerül bevezetésre a gázáram (levegő - CO₂ megfelelő arányú keveréke), az output ágon pedig a gázok a reakcióközegen (alga – tápoldat – anyagcsere-termékek) áthaladva távoznak a reaktorból. A gázkivezető (output) csonkról van leágaztatva egy mintavételezésre, illetve tápanyag injektálásra szolgáló teflon anyagú csővezeték.

- Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok -

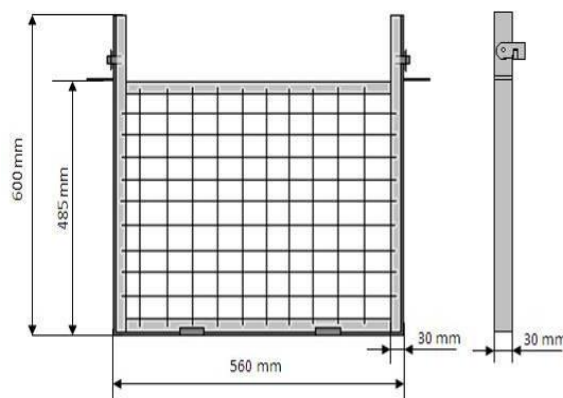
A mintavételezési cső anyagának köszönhetően az algák nem tapadnak meg a cső belsejében (mintavételezést követően), így elkerülhetőek az üzem közbeni dugulások. Ehhez a rendszerhez történik a különböző berendezések, illetve készülékek közvetlen installálása (**13. ábra, F15. függelék**).



13. ábra A bioreaktor sematikus ábrája

2.3.1.2. A reaktor külső keretének kialakítása

Az előzőekben leírt polietilén zsák és a benne lévő belső keret egy speciálisan kialakított és legyártott külső fémkeretbe kerülnek behelyezésre (**14. ábra**), ami biztosítja a megfelelő geometriát és stabil rögzíthetőséget. A fent leírtak szerint kialakított reaktor maximálisan 10 dm^3 térfogatú.

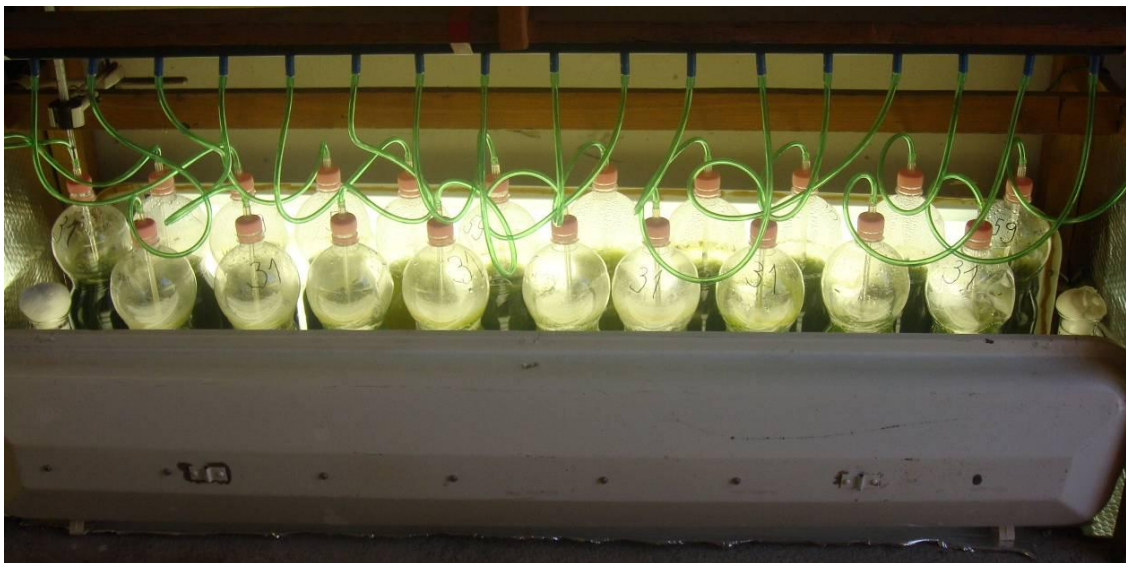


14. ábra Külső keret

2.3.2. A laboratóriumi tápoldatvizsgálatokhoz és/vagy a sokkolási kísérletekhez kialakított foto-bioreaktorok

Más típusú és célú készülékek kiépítése is szükségesé vált a kutatások során, amellyel a törzsminták szaporítása, illetve a sokkolási folyamat (lipidtartalom növelés), valamint a tápoldat vizsgálatok lefolytathatóak. Ezek a berendezések egy jóval egyszerűbb kivitelű és kevesebb figyelmet igénylő konstrukciók, mint a mennyiségi termesztésre szolgáló, előzőekben leírt foto-bioreaktor egység. Két darab horizontális helyzetben elhelyezett, illetve rögzített fénycsőarmatúra fogja közre azt a térrészt, amelybe áttetsző 2 dm³-es műanyag palackokban lehet elhelyezni a vizsgálni kívánt mintákat, illetve a szaporítandó törzsoldatokat.

Az egyik ilyen jellegű „készülékben” csak levegő bevezetés van. Egyszerre 20 darab palackot lehet ellátni levegővel (**15. ábra**), a palack zárófedelére épített buborékoltató csövön keresztül (sokkoló/érlelő raktor, *SR*).



15. ábra Sokkolás folyamatához kialakított szerkezet

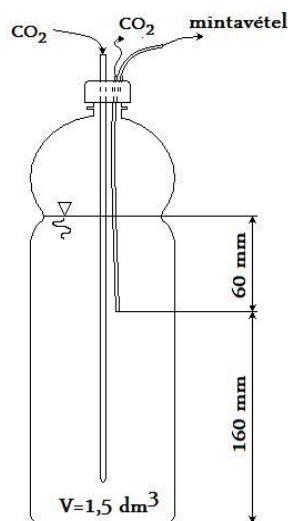
- Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok -

A másik, úgynevezett tápoldat vizsgáló (TV) egységbe lehetőség van CO₂ gáz bekeverésére is, amivel 24 palack táplálása lehetséges (16. ábra).



16. ábra Tápoldat vizsgálathoz (TV) kialakított szerkezet

A CO₂ vagy CO₂ tartalmú gázkeverék áramoltatását a 17. ábrán látható kialakítással oldottam meg. A kiáramló CO₂ ilyen módon biztonságosan kijuttatható a laboratóriumból. A készülék jobb oldalán látható kondenzátum gyűjtő palack pedig megakadályozta, hogy az esetleges kihabzás, vagy nagyobb mértékű párolgás következtében jelentős mennyiségű mintavesztésünk legyen, ami magát a kísérleti eredményekből levont következtetéseket is tévútra vitte volna. Ez a kialakítás segítette, hogy a később részletezett, 3.2.2. fejezetben ismertetett „Szén-dioxiddal történő „fojtás” (Flow Choke with Carbon Dioxide – FCCD)”-os előkísérleteimet megfelelő keretek között tudjam elvégezni.

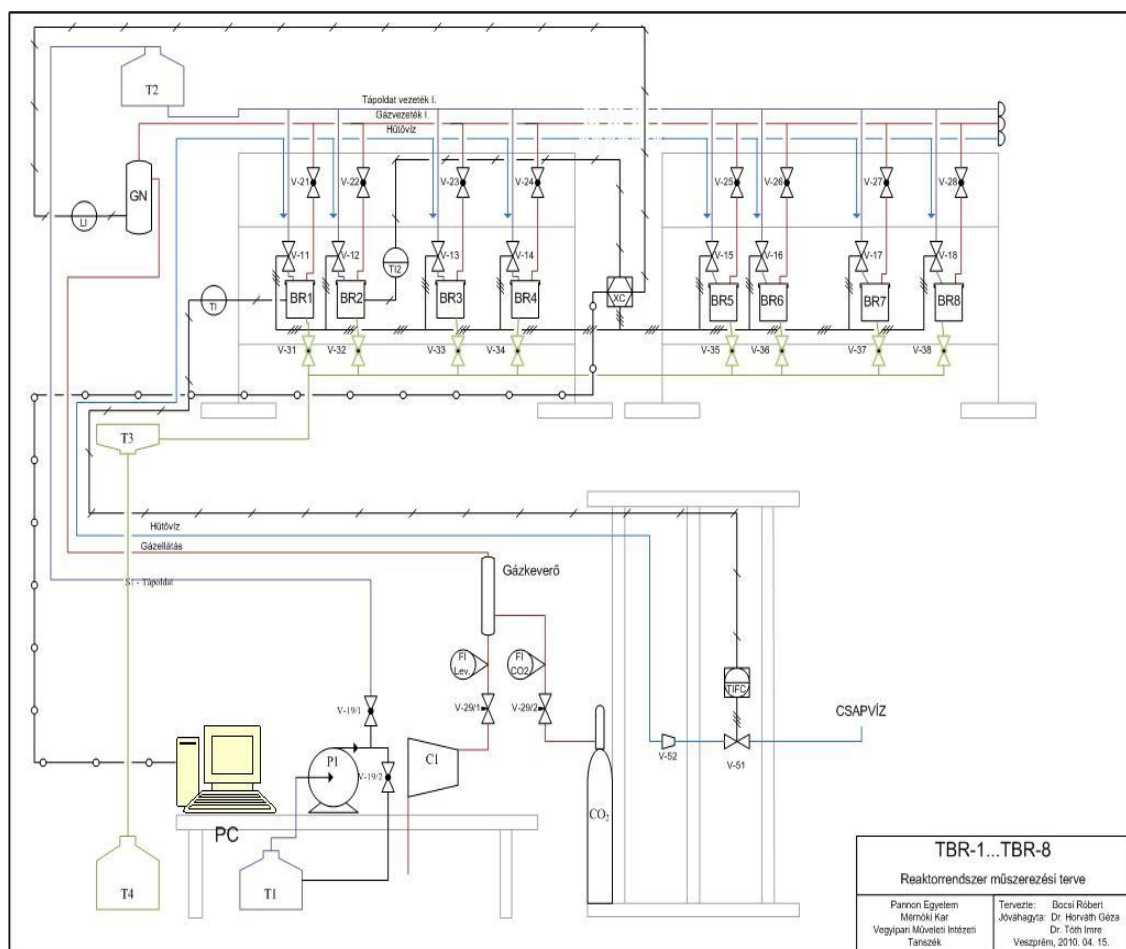


17. ábra Törzsoldat vizsgáló berendezés foto-bioreaktor palackjainak kialakítása

2.3.3. Természetes környezetben installált foto-bioreaktorok

A laboratóriumi konstrukció (*R*) némi módosítása után a továbbiakban lehetőség nyílt az algák természetes körülmények között történő vizsgálatára, mennyiségi termelésének megkezdésére. A reaktorok a már fent leírt (laboratóriumi tenyésztoreaktorok) alapokon készültek el, és működésük elve is azonos a laboratóriumi-reaktorokéval.

A természetben installált foto-bioreaktor (*TR*) szerkezete, kapcsolási rajza a **18. ábrán** látható (**F16. függelék**).



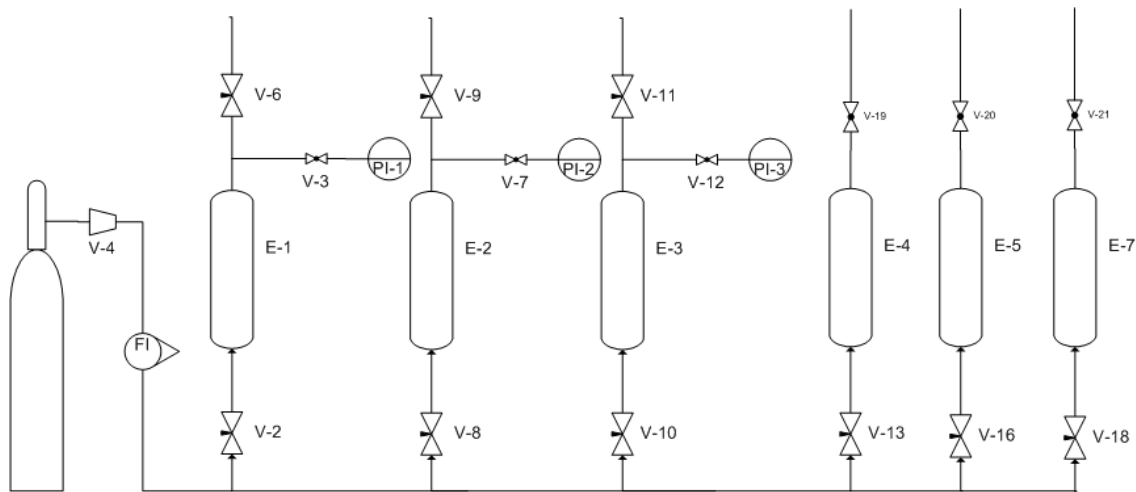
18. ábra Szabadba telepített nagylaboratóriumi foto-bioreaktor (műszerezési terv)

A pilot reaktorok képe az **F17. függelékben** látható, ipari (finomítói) környezetben installálva. A megtervezett és legyártott foto-bioreaktorok alkalmasnak bizonyultak az irodalmi adatok reprodukálására.

Elmondható, hogy a készülékek tervezése során kitűzött céljainknak maximálisan megfelelnek az általam tervezett és legyártott egységek.

2.4. Készülék építése a CO₂-fojtás paramétereinek meghatározásához

Újjonan megfigyelt jelenség (CO₂-fojtás, FCCD, lásd később 3.2.2. fejezetben) vizsgálatához, optimális működési paramétereinek definiálásához terveztem és építettem meg az alábbi kísérleti berendezést (**19. ábra**).



19. ábra Kísérleti berendezés fojtásos kísérletek elvégzéséhez

A modulok 50 mm átmérőjű, 600 mm hosszúságú áttetsző plexi csövekből állnak. Az *E-1*, *E-2*, *E-3* ülepítők kialakítása olyan, hogy alkalmasak a nyomás alatti fojtásos kísérletek elvégzésére. Az *E-4*, *E-5*, *E-6* atmoszférikus nyomáson történő mérésekre alkalmasak. A csökapcsolatok kialakítására a pneumatikában használatos 6/4-es poliuretán és *PVC* csöveket használtam. Az előre gyártott kötőelemek segítségével a készülék kapcsolásainak módosítása könnyen megoldható.

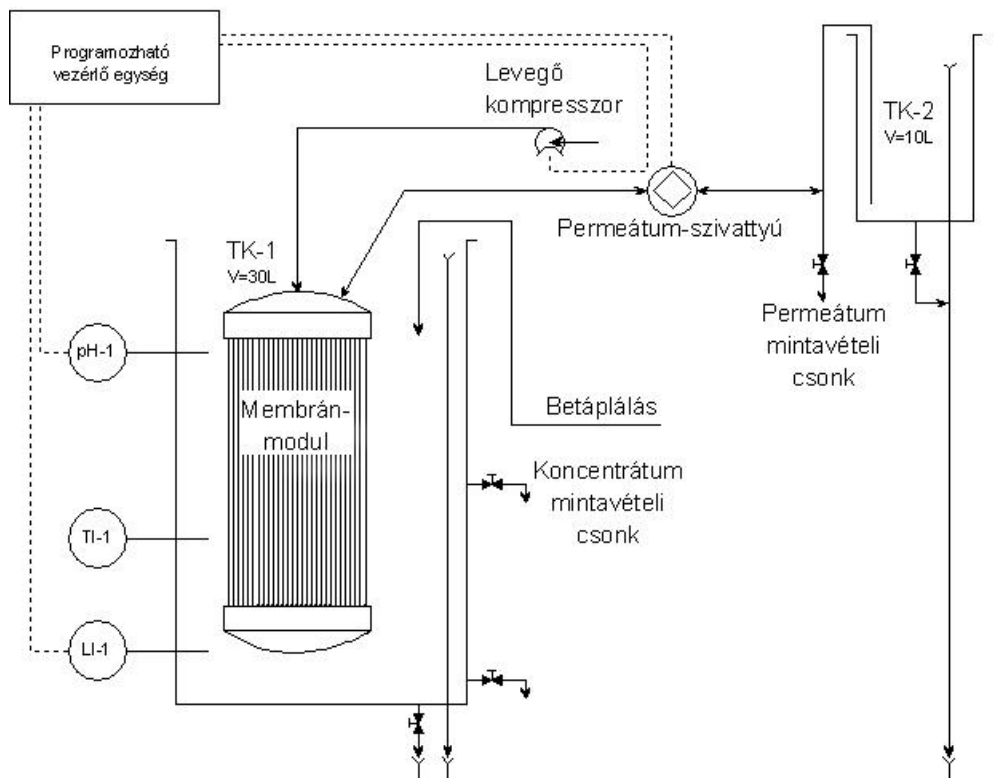
2.5. Mikroszűréshez használt készülék bemutatása

A sűrítési, tisztítási kísérletek elvégzéséhez *ZW-10* modullal szerelt, *PLC* vezérléssel ellátott készüléket használtam (**F18. függelék**). A készülék a permeátumáram iránya szerint outside-in típusú műveletet hajt végre. A méréseket a Zenon cég által forgalmazott *ZW-10* immerziós modul felhasználásával végeztem el. A membrán a specifikáció szerint alkalmas az 1 µm feletti szemcseméretű részecskék visszatartására is, így alkalmas az általunk felszaporított mikroalga sejtek betöményítésére. A modul üreges rost típusú 4,5 mm külső átmérőjű, 0,04 µm pórusméretű membránszalak kötegeből áll (**F19. függelék**).

- Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok -

A membrán összes felülete $0,9 \text{ m}^2$, ebből a membránkitöltési sűrűség $289 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Gyártó előírása, hogy a membrán két oldala közti nyomáskülönbség (Δp_m) huzamosabb ideig a $\pm 0,5 \text{ bar}$ nyomástartományon kívül ne essék. Amennyiben a $|\Delta p_m|$ értéke tartósan $0,6 \text{ bar}$ feletti értéket vesz fel, a membrán átteresztőképességének irreverzibilis csökkenésére lehet számítani. A csökkenés oka, hogy a túl nagy nyomáskülönbség strukturális változásokat, pórus-összeroppanást okoz.

A modul egy *PLC* vezérléssel ellátott készülék részegységeként működik. A készülék felépítése, kapcsolási rajza a **20. ábrán** látható.



20. ábra A mikroszűrő berendezés felépítése

A készülékben működtetett levegőkompresszor segítségével a membránszálak mellett (**F19. függelék**) közvetlenül levegőt fúvattam be, ami a felület tisztulását segítette elő, valamint a légbuborékok keverő hatása miatt biztosította az egyenletes algaszuszpenzió összetételt. A sűrítőtartályba való gázbeporlasztás akár flotálásra is lehetőséget ad, és így a két módszer (membránszűrés, flotálás) egyidejű használata növelheti a szeparáció hatásosságát. A mikroszűrés egyik kulcsfontosságú egysége a permeátumszivattyú. Ez a szivattyú mikroszűrés (*MF*) üzemmódban gondoskodik a permeátum elvételről és visszamosás (*BP*) üzemmódban a permeátum visszaszivattyúzásáról.

- Vizsgálati módszerek, felhasznált anyagok -

A vezérlő modulba beépített frekvenciaváltó biztosítja a szivattyú kétirányú működését és a fokozatmentes motorsebesség változást.

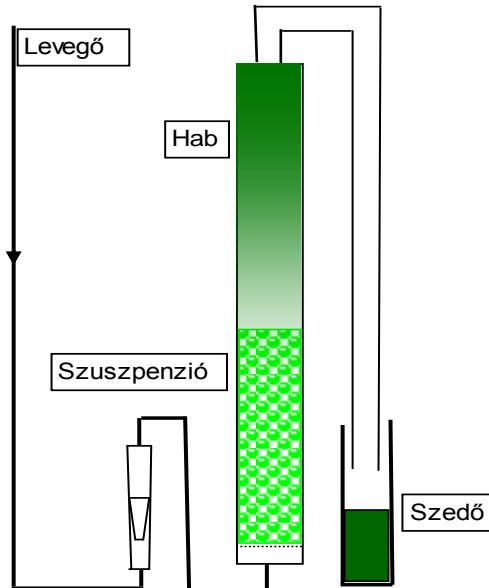
A permeátum elvételi ágban egy manométer található, amely információt ad arról, hogy működés közben mekkora a membrán permeátum oldalán a túlnyomás. A készülék működése során a mikroalga szuszpenziót a technikai tartályba (*TK-1*) vezetjük be. Ez egy 30 dm³ térfogatú, négyzet alapú hasáb alakú tartály. A tartályban egy szintmérő (*LI-1*) és egy *pH*-mérő (*pH-1*) szondát helyeztek el, valamint egy hőmérő (*TI-1*) is beépítésre került.

A permeátumot (leválasztott tápközeg) a *TK-2*, 10 dm³ térfogatú permeátum-tartályba vezettem, és innen láttam el a visszamosás permeátumigényét is. A permeátum szakaszos elvétele a mintavételi csonkon, folyamatos elvétele a túlfolyón keresztül történt.

A készülék általános tisztítása után beszerelésre került egy használt *ZW-10* membránmodul. A modul előélete ismert, élőiszapos szennyvíztisztítási kísérleteket végeztek vele, és tárolása előtt a szükséges konzerváló műveleteket elvégezték. A membrán használatbavétel előtt a forgalmazó által előírt regenerálási procedúrán esett át. A használt modul tesztelését csapvízzel végeztem. Ez a teszt informált a konzerválás sikerességéről és egyúttal arról, hogy a membrán mérésre kész állapotba került.

2.6. Habflotáláshoz összeállított kísérleti berendezés

Habflotálási kísérleteimhez az alábbi készüléket állítottam össze (**21. ábra**).



21. ábra Habflotáló berendezés vázlata

A flotáló oszlop egy alul üvegfrittel (cserélhető üvegfritt, aminek segítségével többféle pórusméreten tudtam beporlasztani a levegőt) ellátott üvegoszlop, $M = 105$ mm magassággal, és $D_b = 20$ mm átmérővel. A fritt alá rotaméteren keresztül vezettem be a levegőt, változtatható térfogatárammal, $L = 0-100$ dm³/h. Az üvegoszlopba 100-200 cm³ szuszpenziót töltöttem, az oszlop tetejéhez csatlakoztattam a műanyag csövet, amely a szedőedénybe vezette a habot.

3. Kísérleti munka és eredmények bemutatása

3.1. Várható CO₂ befogás és lipdkihozatal becslése

Becslésem egy az arizónai sivatagban működő algatelep hozzáférhető adatai alapján végeztem el, majd ezt konvertáltam magyarországi viszonyokra. A GreenFuel cég készülékének adatai az **F20. függelék**ben találhatóak. (A mértékegységeket nem csupán az SI-mértékegységrendszernek megfelelően adom meg a becslés folyamán, hogy az e témában még fellelhető szakirodalmakkal könnyen összevethető legyen.)

A példaszámítás bevezetéséhez szükséges figyelembe vennünk a következő információkat, adatokat: biológiából ismerve az algák összetételét – az algák (száraz tömegükhöz viszonyítva) 50-60 %-ban szénből álló élőlények, és ezt a szenet CO₂-ból tudják beépíteni – látható, hogy körülbelül 1,9 -szer akkora tömegű alga szükséges, mint amekkora tömegű CO₂-ot el akarunk vele nyeletni.

Az az energia, amit a növények elméletileg hasznosítani tudnak a sivatagi égövön (példaszámítás miatt lényeges adat) a napenergia 11 %-a. Arizónában (tényleges meteorológiai adatokat figyelembe véve) az évi napsütéses óraszám 5808 h.

Az előzőekből kiszámítható egy átlagos napsugárzás: $5,7 \text{ kWh/m}^2/\text{nap} = 2080,5 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$. $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ millió Joule}$, és $1 \text{ Joule} = 0,0002388 \text{ kcal}$, ez egyenértékű: $2080,5 * 3,6 * 10^6 * 0,0002388 = 1,79 * 10^6 \text{ kcal/m}^2/\text{év} = 7,49 * 10^{10} \text{ J/m}^2/\text{év}$.

A 11 % maximális elméleti fotoszintézis hatásfokot figyelembevéve a $1,97 * 10^5 \text{ kcal/m}^2/\text{év} = 8,25 * 10^9 \text{ J/m}^2/\text{év}$ rendelkezésre álló energia ismeretében számolhatom az előállítható glükóz mennyiséget. 1 mol glükóz fotoszintetizálásához $686 \text{ kcal} = 2,87 * 10^6 \text{ J}$ szükséges.

$M_{\text{glükóz}} = 180 \text{ g/mol} (7,49 * 10^9 \text{ J/m}^2/\text{év} / 2,87 * 10^6 \text{ J/mol}) * 180 \text{ g/mol} = 51690,96 \text{ g/m}^2/\text{év} = 51,7 \text{ kg/m}^2/\text{év}$, azaz az elméleti termelékenység = 51,7 kg/m²/év.

Gyakorlatban mért adat = 36 kg/m²/év. Ez 70 %-a az elméleti termelékenység maximumnak és 7,7 %-a a maximális elméleti fotoszintetizálási hatásfoknak.

Arizónai kutatók ettől valamivel kisebb értékkel számoltak tovább, a termelési értékek átlagolása miatt: $29,2 \text{ kg/m}^2/\text{év} = 80 \text{ g/m}^2/\text{nap}$. Valamint azt is feltételezték, hogy az algamező 85 %-a fog a számítottak szerint (gond nélkül) termelni: $24,8 \text{ kg/m}^2/\text{év}$. A példaszámítás első bekezdésében leírtak következményeként – alga több mint 50 % szénből áll - a termelt biomassa minden egyes tonnája 1,9 tonna CO₂-t nyel el, azaz $24,8 \text{ kg/m}^2/\text{év} * 1,9 = 47 \text{ kg/m}^2/\text{év}$ CO₂-t tud beépíteni.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Az algagazdaság 100 hektáron fekszik (= 247 hold = 1 km²) → 47 000 t CO₂/év a CO₂ elnyelő képessége. Kísérleti adatokból számolták, hogy 1 holdnyi algából (5500-15000 gallon = 20819,76-56781,18 dm³ ⇒) 20,82-56,78 m³ közötti mennyiségű biodízel állítható elő egy év alatt. 10000 gallon/hold/év értékkel számolva a termelhető biodízel mennyiség: 2,47 millió gallon/év = 9350 m³ biodízel/év érték.

Az Arizónai adatokat 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemre vonatkoztatva a következő értékek adódnak: 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemhez 7,77 km²-es (1920 hold) algagazdaság szükségeltetne, azaz 10000 gallon/hold/év, 19,19 millió gallon/év = 72,65 millió dm³/év = 72649 m³ biodízelt lehetne előállítani évente.

A fenti példát magyarországi adatokra átszámolva: napsugárzást használó foto-bioreaktorokban a mérsékelt éghajlati övön 4 %-os fényenergia hasznosításra lehet számítani, az összehasonlíthatóság végett kiszámítom 11 %-os energiahasznosítás esetére is az adatokat.

Az átlagos napsugárzás intenzitása 900 - 1000 W/m² (nemzetközileg elfogadott adat: 800 W/m²). A kevésbé napos területeken - mint például Alpokalja, Kisalföld északnyugati része, Szabolcs-Szatmár-Bereg megye - 850 W/m², az ország többi részén 850 - 990 W/m² között változik a sugárzás intenzitása. Az évi 2000 - 2200 óra napsütés mellett 280 - 300 nap adna lehetőséget az algamezők működtetésére.

Az átlagos napsugárzás (átlagolt adatokkal számolva 800 W/m², 2100 h, 290 nap): 1,7 kWh/m²/nap = 620,5 kWh/m²/év. 1 kWh = 3,6 millió Joule, és 1 Joule = 0,0002388 kcal, ez egyenértékű: 620,5*3,6*10⁶*0,0002388 = 0,53*10⁶ kcal/m²/év = 2,22*10¹⁰ J/m²/év-vel.

A **11 %** maximum elméleti fotoszintézis hatásfokot figyelembe véve: a 0,58*10⁵ kcal/m²/év = 2,43*10⁹ J/m²/év rendelkezésre álló energia ismeretében számolom ki az előállítható glükóz mennyiséget. 1 mol glükóz fotoszintetizálásához 686 kcal = 2,87*10⁶ J szükséges. $M_{glükóz} = 180$ g/mol (2,43*10⁹ J/m²/év / 2,87*10⁶ J/mol) * 180 g/mol = 15218,66 g/m²/év = 15,2 kg/m²/év, azaz az elméleti termelékenység = 15,2 kg/m²/év. Az elméleti termelékenység a maximumnak a 70 %-a (arizónai mért adat), így a gyakorlati termelés becsült értéke = 10,64 kg/m²/év.

Az arizónai kutatók által megbecsült termelésingadozást a példában is szem előtt tartom így: 6 kg/m²/év (= 17 g/m²/nap) termelést veszek. Az algamező 85 %-a fog a számítottak szerint (gond nélkül) termelni, tehát 5,1 kg/m²/év-nek adódik ez az érték.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Az előző példában leírtak szerint: a termelt biomassza minden egyes tonnája 1,9 tonna CO₂-t nyel el, ami $5,1 \text{ kg/m}^2\text{-év} * 1,9 = 9,7 \text{ kg/m}^2\text{/év}$. Ha 100 hektáros algagazdaságunk lenne (247 hold = 1 km²) akkor ennek 9690 t CO₂/év a CO₂ elnyelő képessége.

Magyarországról nincs adat, amiből pontosan meg lehetne mondani a holdankénti előállítható biodízel mennyiséget, de az arizónai adatok alapján megbecsülhető (mivel Magyarországon az algák várhatóan 21 %-kal kevésbé lennének termelékenyek, mint Arizónában, lásd elméleti kitermelések arányát, ezért nálunk 2100 gallon/hold/év): 518700 gallon/év = 1964 m³ biodízel/év a becült adat.

Átszámolva a példát 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemre a következő értékek adódnak: 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemhez 37,67 km²-es (= 9305 hold) algagazdaság szükségeltetne, ami (2100 gallon/hold/év, 19,54 millió gallon/év = 73,97 millió dm³/év => 73967 m³ biodízel/év becült értékkel üzemelhetne.

A 4 % maximum elméleti fotoszintézis hatásfokot figyelembe véve, az előző bemutatott példa szerint: $0,212 * 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{/év} = 8,88 * 10^8 \text{ J/m}^2\text{/év}$ rendelkezésre álló energia ismeretében számolhatom az előállítható glükóz mennyiséget. $(8,88 * 10^8 \text{ J/m}^2\text{/év} / 2,87 * 10^6 \text{ J/mol}) * 180 \text{ g/mol} = 5562,68 \text{ g/m}^2\text{/év} = 5,6 \text{ kg/m}^2\text{/év}$, azaz az elméleti termelékenység = 5,6 kg/m²/év értéknek adódik. Az elméleti termelékenység a maximumnak 70 %-át (arizónai mért adat) figyelembe véve a gyakorlati termelés becült értéke: 3,92 kg/m²/év. Termelés ingadozás miatt 3 kg/m²/év (= 8,2 g/m²/nap) termelést veszek. Az algamező 85 %-a fog a számítottak szerint (gond nélkül) termelni, ami (2,6 kg/m²/év, ami $2,6 \text{ kg/m}^2\text{/év} * 1,9 =$) 4,9 kg CO₂/m²/év beépülést eredményez. 100 hektáros algagazdaság esetén (= 247 hold = 1 km²), tehát 4845 t CO₂/év a CO₂ elnyelő képesség.

A holdankénti előállítható biodízel mennyiség, az arizónai adatok alapján megbecsülhető (mivel Magyarországon az algák várhatóan 10,8 %-al kevésbé lennének termelékenyek, mint Arizónában, lásd elméleti kitermelések arányát, így ez az érték 266760 gallon/év): 1010 m³ biodízel/év. Átszámolva a példát 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemre a következő értékek adódnak: 1000 t CO₂/nap kibocsátású üzemhez 75,19 km²-es (= 18572 hold) algagazdaság szükségeltetne, és így a becült biodízelmennyiség (1080 gallon/hold/év = 20,06 millió gallon/év) 75927 m³ biodízel/év értéknek adódik.

9. táblázat Arizónára és Magyarországra vonatkozó számítások adatainak és eredményeinek táblázatos összefoglalása

	Arizóna (létező üzem adatai)*	Magyarország (11%)	Magyarország (4%)
terület	100 hektár = 1 km ²	100 hektár = 1 km ²	100 hektár = 1 km ²
évi napsütéses óraszám	5808 h	2100 h	2100 h
átlagos napsugárzás	5,7 kWh/m ² /nap	1,7 kWh/m ² /nap	1,7 kWh/m ² /nap
	2080,5 kWh/m ² /év	620,5 kWh/m ² /év	620,5 kWh/m ² /év
elméleti termelékenység	51,7 kg/m ² /év	15,2 kg/m ² /év	5,6 kg/m ² /év
mért termelékenység	36 kg/m ² /év	10,64 kg/m ² /év **	3,92 kg/m ² /év **
CO ₂ felvevő képesség	47 kg/m ² /év	9,7 kg/m ² /év	4,9 kg/m ² /év
	47000 t/km ² /év	9690 t/km ² /év	4845 t/km ² /év
termelhető biodízel	2,47 millió gallon/év	518700 gallon/év	266760 gallon/év
	9350 m ³ /év	1964 m ³ /év	1010 m ³ /év
1000 t CO₂/nap kibocsátású üzem			
algatelep felülete **	7,77 km ²	37,67 km ²	75,19 km ²
termelhető biodízel	19,19 millió gallon/év	19,54 millió gallon/év	20,06 millió gallon/év
**	72649 m ³ /év	73967 m ³ /év	75927 m ³ /év
	*GreenFuel Technologies Corporation (F20.)		** becsült adatok

A fenti számításokból kiemeltem az algatermelékenységre vonatkozó számadatokat, amelyek igazán jól érzékeltetik, hogy milyen különbségek vannak az égővi régiók között (**10. táblázat**).

10. táblázat Algatermelékenység összehasonlítása

Algatermelékenység		
Arizóna	Magyarország (11%)	Magyarország (4%)
150 t/ha/év	31 t/ha/év	16 t/ha/év

Látható, hogy ha 100 %-nak tekintem az arizónai termelékenységet, Magyarországon a 11 %-os napenergia hasznosítást figyelembe véve 20,7 %-os termelékenység lenne elérhető, a 4 %-os energiahasznosítással pedig 10,7 %-os az algára vonatkoztatott termelékenység.

3.2. Autoflokkulációs vizsgálatok

Az irodalmi áttekintésben leírtakon túl kísérleteim során azt tapasztaltam, hogy az autoflokkuláció abban az esetben is megindulhat, ha a tápkomponensek mennyisége nem megfelelő.

A *pH* hatásának vizsgálatokor a kísérleteim során Rawat és kollégáinak (2013) megfigyelését tapasztaltam, mely szerint 8,5-ös *pH* érték felett beindul az algasejtek töltéseinek semlegesedése [14]. Pendersen (2003) állításai is bebizonyítást nyertek kísérleteim során, miszerint *pH* növekedésekor (*pH* = 9,5) a szaporodási aktivitás csökken [164], az autoflokkuláció pedig megindul.

3.2.1. A szén-dioxid betáplálás megszüntetése

A kísérletet úgy hajtottam végre, hogy a szaporító reaktorból 500 ml-es mintákat vettem ki, különböző algafajokból és különböző szaporodási periódusokból (eltérő élelciklusokból).

Az átlagos ülepedési sebesség értéke körülbelül ~ 3 mm/h volt a szaporodási fázisból (log-, II. köztes fázis), ~ 5 mm/h a stacioner fázisból kivett szuszpenziók esetében, ami a felhasználhatóság tekintetében elfogadhatatlanul kicsi érték. A pusztuló (elhalási fázis kezdete) kultúrák átlagos ülepedési sebessége az előzőnél magasabb értéket mutatott, ~ 5,5 mm/h-t, ami még mindig elfogadhatatlan érték számunkra. Az ülepedési sebességekre kapott értékeket az **F21. függelék** tartalmazza.

Az ülepítés során az alsó, sűrűzagy réteg nehezen, hosszú idő után alakul ki és lassan növekszik, a szuszpenziós rétegben nagy a koncentráció gradiens, a szuszpenzió és a tiszta folyadék határvonala a legtöbb esetben nem éles.

3.2.2. Szén-dioxiddal történő „fojtás” (Flow Choke with Carbon Dioxide - FCCD)

Egy teljesen új megközelítése az autoflokkuláció jelenségének, amelyre a kutatásaim során figyeltem fel, és elkezdtem vizsgálni. Az autoflokkuláció jelenségének kiterjesztéséről van szó azáltal, hogy az ülepeteni kívánt elegyet tiszta CO₂-dal telítem, az elegyet tartalmazó palackot lezárást követően folyamatos sötét fázisban tartom.

Az ülepedési sebességek növekednek (**11. táblázat**), és egy teljesebb kiülepedés figyelhető meg az előző kísérlethez viszonyítva (**22. ábra**).

11. táblázat Autoflokkulációs kísérletek összehasonlítása

Ülepedési kísérletek szaporodási fázisban lévő algaszuszpenziók esetében	Alkalmazott autoflokkulációs módszer	
	CO ₂ betáplálás megszüntetése	CO ₂ fojtás
átlagos ülepedési sebesség [mm/h]	3-5	15-20
Ülepedési kísérletek szaporodási fázist átlépő algaszuszpenziók esetében	CO ₂ betáplálás megszüntetése	CO ₂ fojtás
átlagos ülepedési sebesség [mm/h]	4-7	15-25



22. ábra Az ábra felső részén a CO₂ betáplálás megszüntetésének eredménye, az alsó részen a CO₂ fojtás eredménye látható

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

A jelenség hatásosságának meghatározását célzó előkísérleteket a *TV* berendezésben (2.3.2. fejezet) végeztem. További kísérleteimbe beépítettem azt a megfigyelésem, miszerint a szuszpenzió való tiszta CO₂ gáz átáramoltatása bizonyos körülmények között intenzívebbé tette a kiülepedést.

Minden egyes kísérleti modul egy 2 dm³-es *PET* palackból készült. A kupakon keresztül 1 ml-es pipettákon át vezettem be a CO₂-ot. A szuszpenzióból történő mintavétel teflon csövön keresztül történt. A kísérleti program az alábbi táblázatban látható (**12. táblázat**), a gázelosztóba betáplált CO₂ térfogatárama 240 dm³/h (palackonként 15 dm³/h).

12. táblázat *FCCD* kísérlet adatai

Kísérletsorozat (azonosító kód)	Palack kód	Algafaj	Alga bemérés [dm ³]	Táplódat bemérés [dm ³]	Megvilágítás
1TV17	1	31	1,50	0,00	F
2TV17	2	31	1,50	0,00	F
3TV17	3	31	1,00	0,50	F
4TV17	4	31	1,00	0,50	F
5TV17	5	31	1,00	0,50	F
6TV17	6	31	0,25	1,25	F
7TV17	7	31	0,25	1,25	F
8TV17	8	0	1,00	0,50	F
9TV17	9	31	1,50	0,00	S
10TV17	10	0	1,00	0,50	S
11TV17	11	31	0,25	1,25	S
12TV17	12	31	0,25	1,25	S
13TV17	13	31	1,00	0,50	S
14TV17	14	31	1,00	0,50	S
15TV17	15	31	1,00	0,50	S
16TV17	16	31	1,00	0,50	S

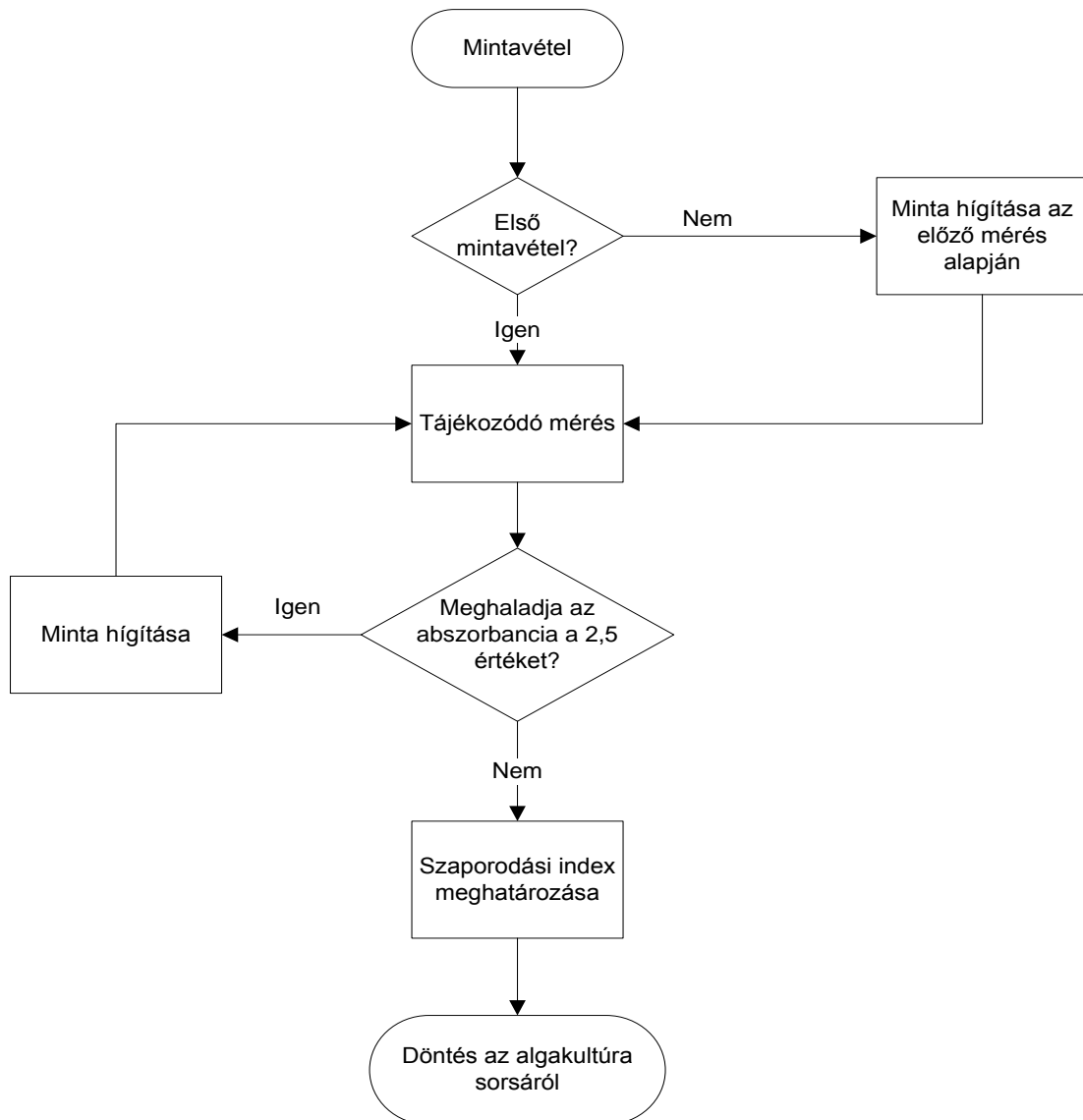
F = mesterséges megvilágítás, fény fázis; S = megvilágítás nélkül, sötét fázis

Szaporodási index meghatározásán az *FCCD* minták méréshez az előzőekben leírt fotométert használtam, 681,5 (±5) nm-nél, a fényabszorbancia méréséhez. A mintavételhez legalább 10 cm³ térfogatú mintavevő edényt kell használni, hogy az esetleges ismétlésekre lehetőség legyen.

A mintát, ha szükséges volt, hígítottam, hogy az abszorbanciája 1,5-2,5 tartományba essék. Ezt követően a hígítás (*H*) és az abszorbancia (*A*_{681,5nm}) szorzataként a szaporodási index (*PI*) számítható.

$$PI = H * A_{681,5nm} \quad (20)$$

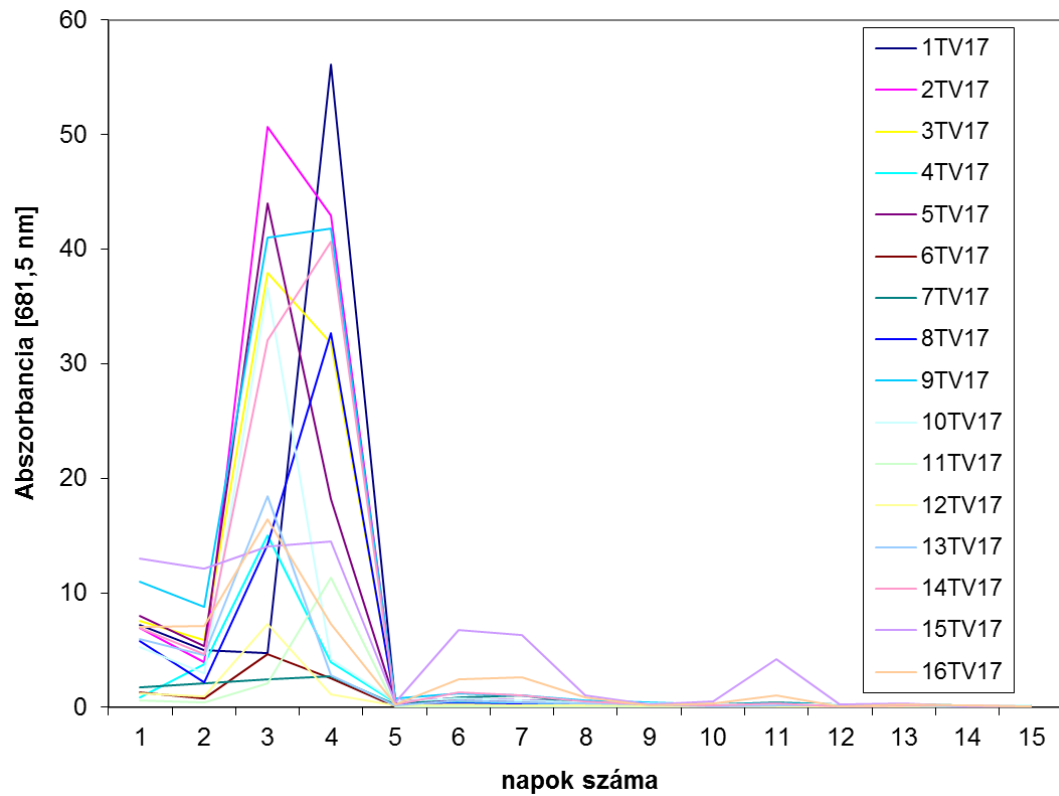
A szaporodási index (a szeparációnál használatos *ABS* értékek meghatározása is ezen a módon zajlik) metódusának meghatározását a **23. ábra** mutatja.



23. ábra A szaporodási index meghatározása

A szaporodási index értékelése során figyelembe kell venni a *pH* alakulását is. A szuszpenzió szaporodási indexe naponta bizonyos ingadozást mutathat a környezeti hatások alakulásának függvényében. Egy megfelelő kondícióban lévő algakultúra 7,5 és 8,5 közötti *pH*-jú (általában vizsgált algakultúrákra érvényes számadat). Az ettől való eltérés valamilyen nem szokványos esemény előjele lehet. Tipikus esete ennek, ha a szaporodási index és a *pH* egyaránt csökkenést mutat. Ez biztos jele annak, hogy a reaktorban nem kívánt folyamatok indultak be.

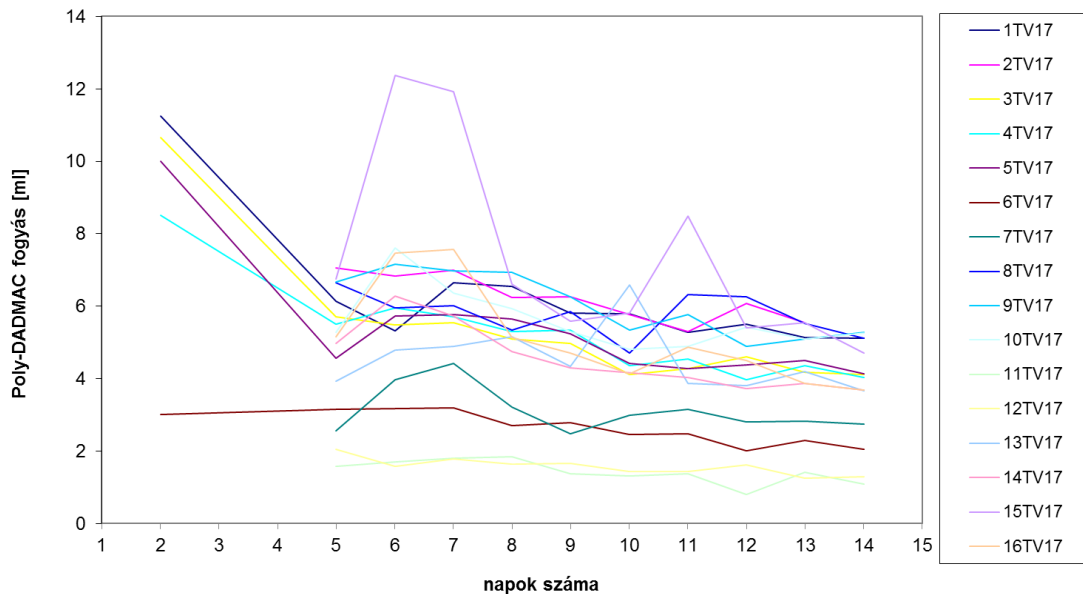
Mérési eredményekből jól látszik (**24. ábra**), hogy a tiszta CO₂ betáplálás első 3-4 napjában egy kiemelkedően intenzív szaporodás indult meg a szuszpenziókban, ami a CO₂ betáplálás megszűnésére lényegében azonnali kiülepedéssel válaszolt.



24. ábra ABS érték időbeni változása FCCD kísérletnél

Az FCCD kísérleteket továbbá PCD mérésekkel (lásd következő oldalon) követtem nyomon és számszerűsítettem.

A **25. ábrán** jól látható, hogy nagyon kismértékű változás volt kimérhető, és nagy értékingadozásokkal, zavarokkal terheltek a mérési görbék.



25. ábra Poly-DADMAC fogyasztásértékek FCCD kísérletnél

Jelen kísérlet elérte a célját, hiszen a minták kiülepedtek. A jelenséget elő tudtam idézni, többszörösen ismételtető módon, viszont a megfelelő analitika hiányában nem lehet leírni, és így tendenciákat, törvényszerűségeket lejegyezni. A későbbi hasznosíthatóság érdekében új módszer kifejlesztésére volt szükségem.

Kidolgoztam egy új mérési metódust a részecske töltöttség detektálásának alkalmazásával, ami az előzőekben leírt hibákat kiküszöböli.

Az ülepedő szuszpenziót vertikálisan több részre osztottam. Alapesetben alsó és felső fázisra. A fázisokból maximum 5-5 cm³ minta levételével, azok részecske-töltöttség vizsgálatával egy - szakirodalomban nem fellelhető - hányadost képeztem, amit relatív részecske-töltöttség megoszlásnak (*RRTM*) neveztem el.

A mérés validálását olyan módon végeztem el, hogy eltérő jellemzőjű mikroalga szuszpenziók abszorbancia, illetve alga koncentráció értékeihez egy adatpárt, illetve egy adatpár hányadosát, *RRTM*-jét kapcsoltam. A vizsgált szuszpenziók alsó és felső fázisából vettem a vizsgált mintákat.

A validálási mérések eredményeit a **13. táblázat** tartalmazza.

13. táblázat RRTM metódus validálási méréseinek összefoglaló táblázata

Szuszpenzió sorszáma	Szuszpenzió fázisa	ABS _{681,5}	PCD q[μeq/g]	C _{alga} [g/dm ³]	RRTM	Szuszpenzió jellemzése
1	Felső	6,0	198	3,2	1,0	homogén
	Alsó	6,0	197	3,2		
2	Felső	0,7	244	1,3	1,3	két fázis között árnyalatbeli különbség
	Alsó	3,7	316	2,2		
3	Felső	0,2	98	0,1	2,1	két fázis definiálható, felső halványzöld, alsó sötétzöld
	Alsó	6,4	201	3,8		
4	Felső	0,0	83	0,0	2,6	szemmel látható kiülepedés, tiszta felső fázissal
	Alsó	2,1	215	3,3		
5	Felső	0,4	126	0,2	2,5	szemmel látható kiülepedés, tiszta felső fázissal
	Alsó	6,9	314	4,8		
6	Felső	1,5	58	1,1	2,4	két fázis definiálható, felső halványzöld, alsó sötétzöld
	Alsó	3,9	139	2,4		
7	Felső	0,0	80	0,1	3,6	szemmel látható kiülepedés, tiszta felső fázissal
	Alsó	1,2	287	0,8		
8	Felső	1,0	279	1,5	1,2	homogén
	Alsó	1,2	335	1,6		
9	Felső	6,9	88	4,1	1,1	homogén
	Alsó	6,9	97	4,0		
10	Felső	4,1	59	2,6	1,8	két fázis definiálható, felső halványzöld, alsó sötétzöld
	Alsó	8,3	106	5,7		
11	Felső	0,2	46	0,0	2,8	szemmel látható kiülepedés, tiszta felső fázissal
	Alsó	9,9	129	8,9		
12	Felső	1,3	248	0,5	1,1	homogén
	Alsó	1,3	273	0,5		

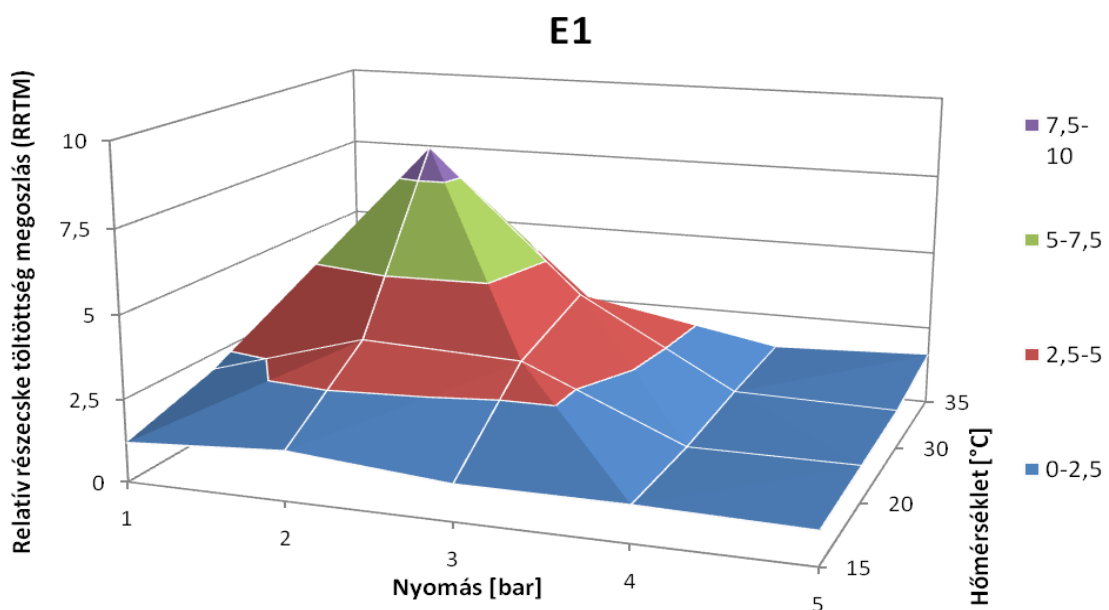
A párhuzamos méréseimet nem tüntettem fel, mert nem mutattak releváns eltéréseket egymástól, ami azt igazolja, hogy megfigyeléseim és felvetéseim helyesnek bizonyultak.

A 13. táblázatból jól látszik, hogy a különböző szuszpenziók egymáshoz viszonyított PCD értékeiből nem olvasható ki olyan információ, amiből helytálló következtetéseket lehetne levonni, mint ahogy azt a készülék ismertetésénél is leírtam.

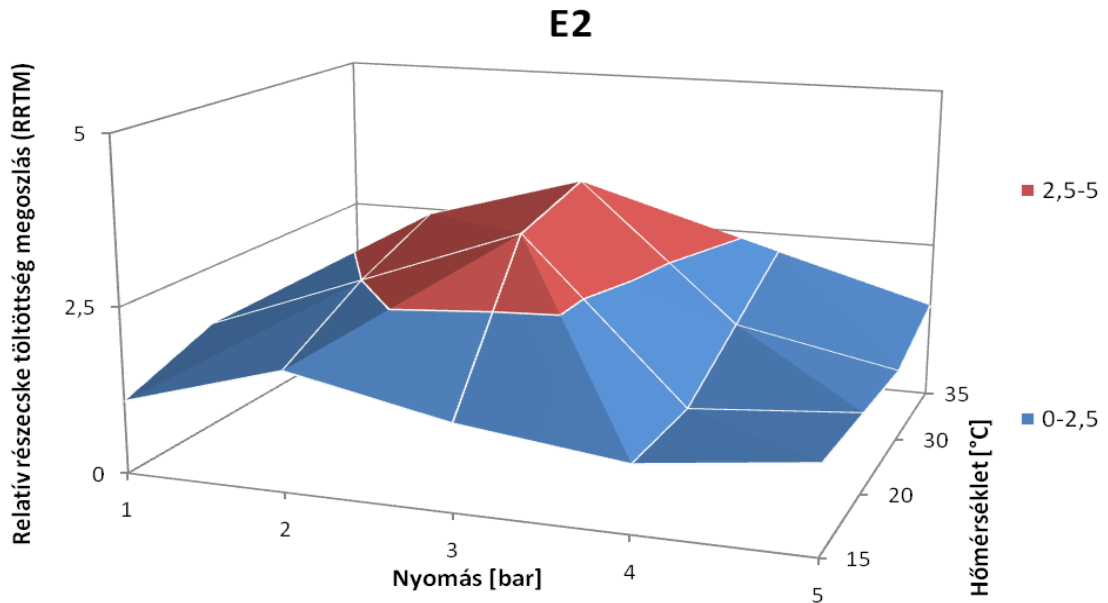
Viszont az adott szuszpenzió belüli (két fázisból) levett minták *PCD* értékeinek hányadosa (*RRTM*) az abszorbanca és koncentráció értékekkel alátámasztva jól mutatja a szuszpenzióban lévő részecskék eloszlását. Ha az *RRTM* értéke eléri a 2,5-ös értéket (és a felett), akkor a két fázis közt olyan szintű részecske, algasejt megoszlás van ami egyértelmű szétülepedésre utal. Ennek tükrében, a későbbi kutatások folyamán lehetőség nyílt az ülepedési jelenség pontosabb megfigyelésére és tudományos leírására. Az új módszer alkalmas az ülepedés jelenségének számszerű detektálására és ezáltal ülepitési paraméterek optimumának meghatározására.

Mivel pontosan nem ismert, hogy mi, hogyan zajlik le az elegyben a „fojtás” során, széles spektrumban kell további vizsgálatokat folytatnom a jelenség kapcsán. (A jelenség az elektrokinetikus potenciállal áll kapcsolatban.) A jelenség paramétereinek kimérésére a 2.4. fejezetben bemutatott berendezést terveztem és építettem meg (**19. ábra**). Kísérleteimnél a következő paramétereket vizsgáltam: az elegy nyomása (*E1-E3*), az átáramoltatott gáz összetétele, az átáramoltatás ideje, az elegy hőmérséklete. Nyomással történő kísérleteimnél szemmel láthatólag kialakult két fázis, az alsó algában dúsuló, felső algában szegényedő fázis, amit a fentebb leírt *RRTM* mérések is igazoltak. A kísérleti időt 180 percre választottam. Ez alatt jól definiálhatóan a térfogat alsó ¼-ében koncentráldott az algatömeg. (180 perc elteltével az állapot nem változott tovább, ezt a levett minták *RRTM* mérései is alátámasztották.)

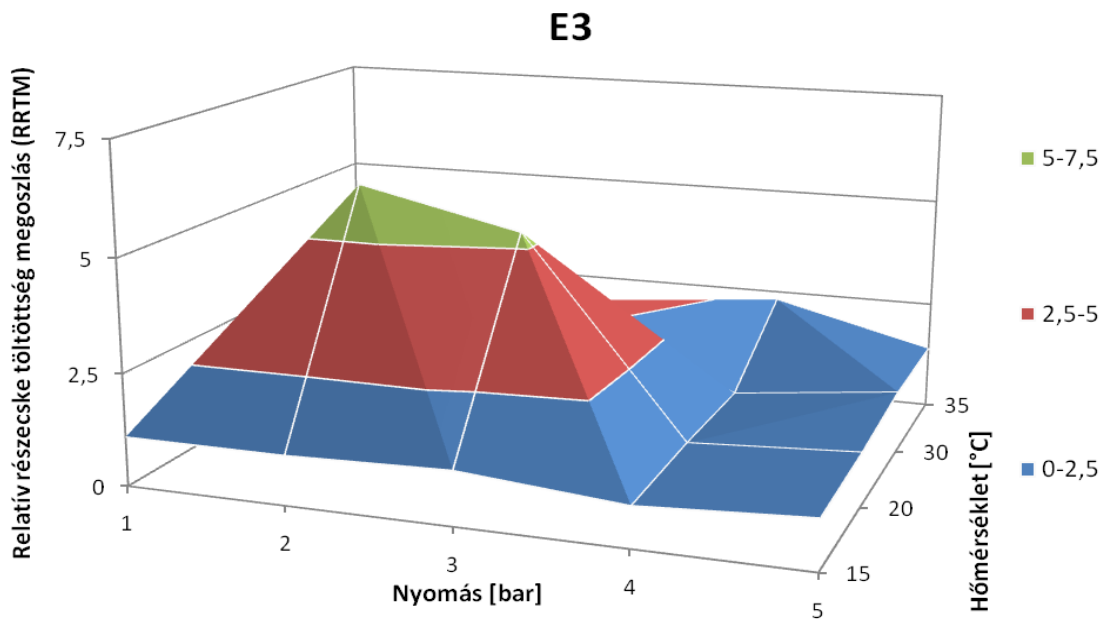
A kísérleti eredményeket a **26-28. ábrák** demonstrálják. A számszerű értékeket táblázatosan a **F22. függelék** tartalmazza.



26. ábra Nyomás alatti *FCCD* kísérlet paramétereinek meghatározása (*E1* ülepitőben)



27. **ábra** Nyomás alatti FCCD kísérlet paramétereinek meghatározása (E2 ülepítőben)



28. **ábra** Nyomás alatti FCCD kísérlet paramétereinek meghatározása (E3 ülepítőben)

A mért paraméterek alapján megállapítható, hogy mindhárom ülepítőben tapasztalható ülepedés egy bizonyos paraméter tartományban. A kézzel jelölt felületeken nem volt megfelelő ülepedés megfigyelhető, ill. mérhető. A piros felületek jól definiálhatóan mutatják az optimális ülepítési paramétereket.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

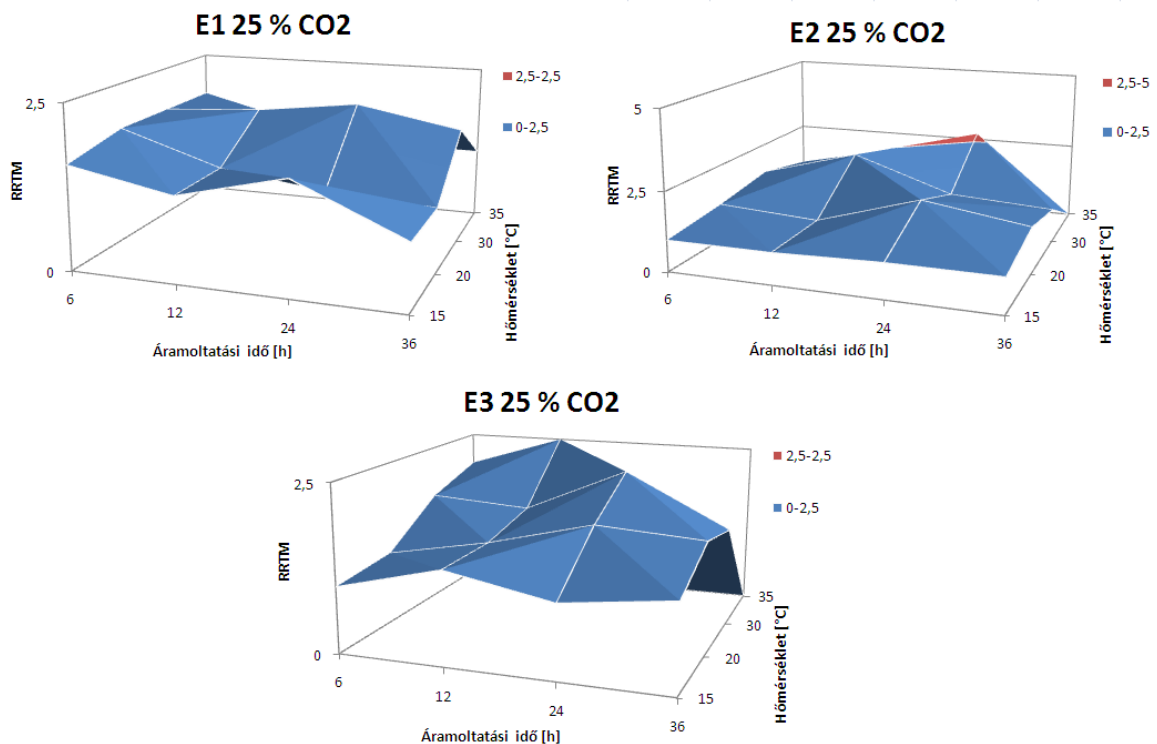
A piros felületek az $2,5 < RRTM < 5$ értékeket mutatják. Az $RRTM > 5$ értékekhez tartozó (p , T) pontokon végzett mérés az ülepedésről nem ad plusz információt. Az ilyen jellegű kiugró értékek (anomáliák) a vizsgált szuszpenzió biológiai mivoltának tulajdoníthatóak.

A fenti ábrákból leolvashatóak az optimális paramétertartományok, miszerint a hőmérséklet $\sim 20-30$ °C között, míg a nyomás optimum $\sim 1,5-3$ bar között állapítható meg (a 3 bar feletti értékeknél - a lefúvatáskor történő CO₂ diffúziója következtében - felpeszgett a szuszpenzió, ami a kísérlet kiindulásához hasonló homogenitású szuszpenziót eredményezett).

Laboratóriumi méretekben jól működő műveletet, és annak működési paramétereit tudtam definiálni, ám nem felejthetjük el a későbbi méretnövelés költségeit (nyomásálló FCCD berendezés), ezért a kisebb beruházási költségigényű átáramoltatásos FCCD kísérleteket is lefolytattam (E4-E6).

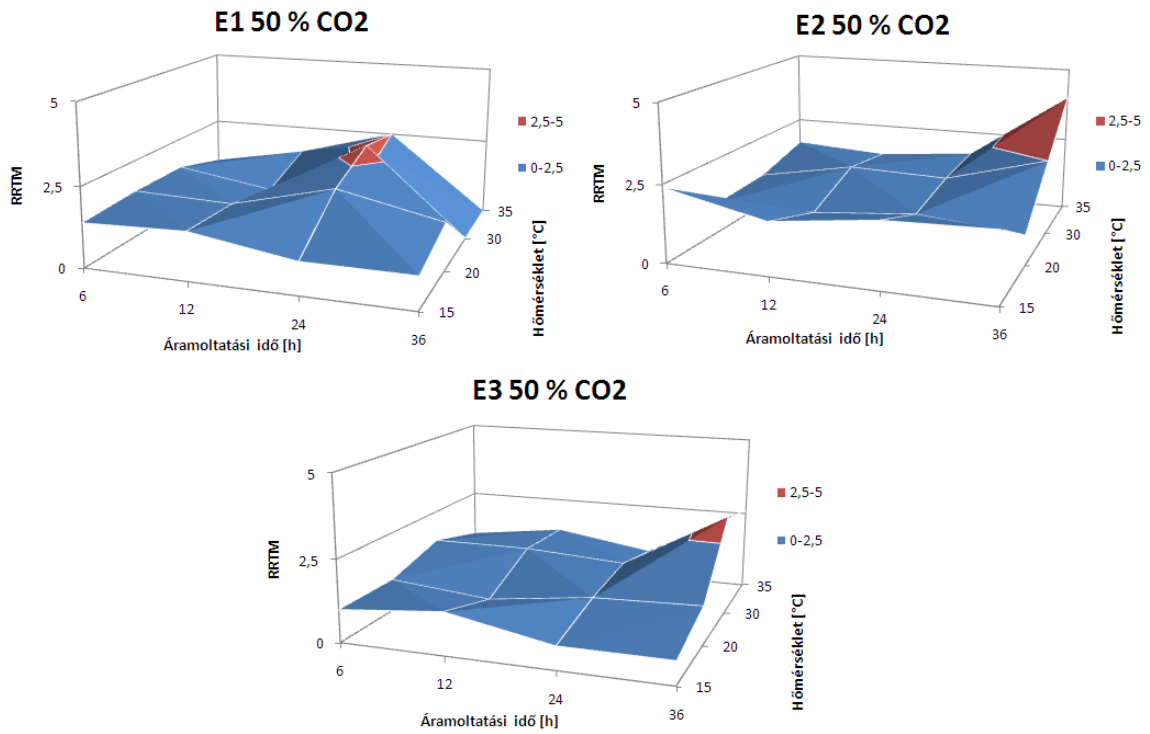
Az átáramoltatásos kísérleteimnél az átáramoltatott gáz CO₂-tartalmát és a hőmérséklet valamint idő paramétereket vizsgáltam.

A kísérleti eredményeket a **29-32. ábrák** tartalmazzák (számszerű értékeit táblázatosan a **F23.a-F23.d függelék** tartalmazza).

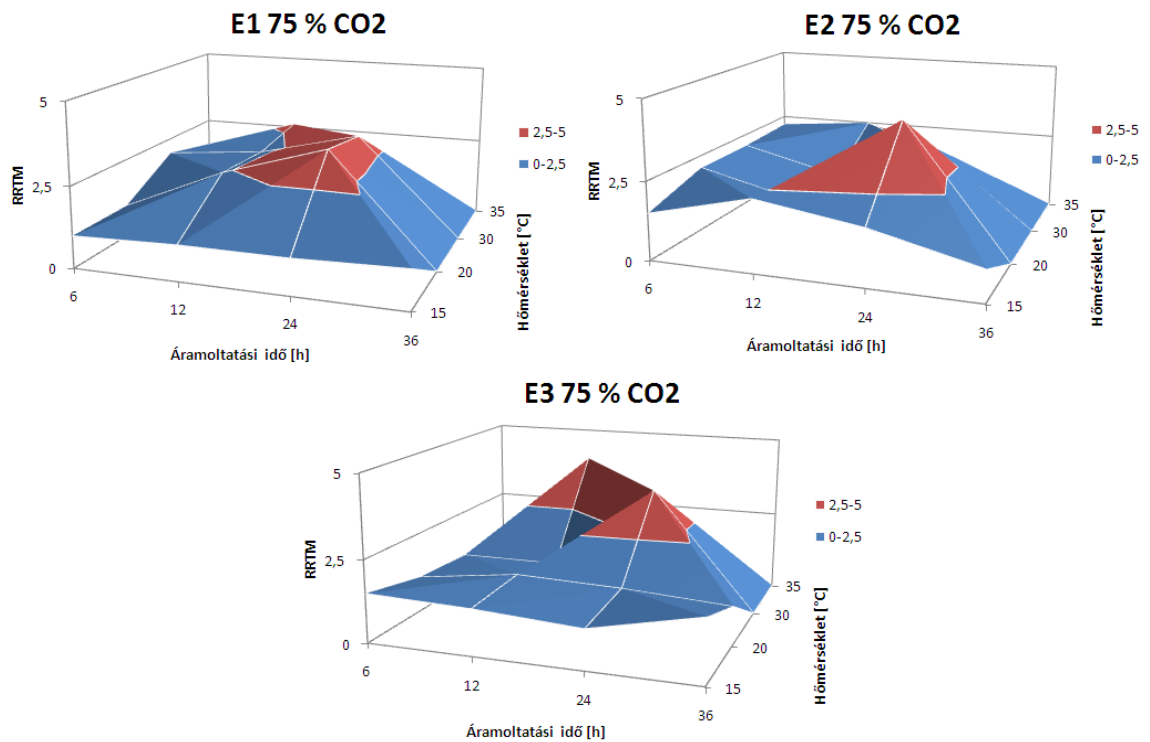


29. ábra Kísérleti eredmények 25 %-os CO₂-tartalmú gáz átáramoltatása esetén

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

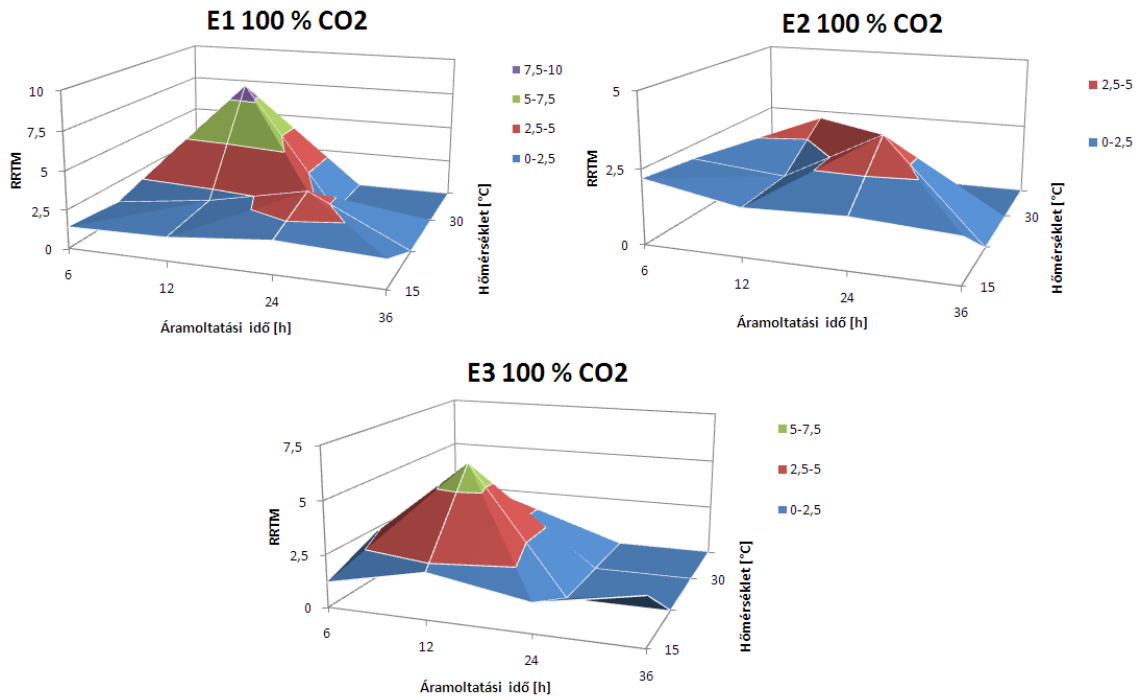


30. ábra Kísérleti eredmények 50 %-os CO₂-tartalmú gáz átáramoltatása esetén



31. ábra Kísérleti eredmények 75 %-os CO₂-tartalmú gáz átáramoltatása esetén

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -



32. ábra Kísérleti eredmények 100 %-os CO₂-tartalmú gáz átáramoltatása esetén

A diagramok nem tartalmazzák a 25 %-nál kevesebb CO₂ tartalmú gázkeverékkel elvégzett kísérleteim eredményeit, mert azok szeparációs szempontból eredménytelennek bizonyultak. A vizsgált paramétertartományokban a sejtek koagulálása nem indult meg, némely esetben stagnálás, más esetekben pedig szaporodás volt megfigyelhető. Szintén elhagytam a kezelt szuszpenzió életkorának és minőségének feltüntetését, mivel a szóbanforgó művelet lefolyása és a szuszpenzió állapota között nem tapasztaltam összefüggést. Különböző minőségű szuszpenziók azonos teljesítménnyel szűrhetők a vizsgált tartományokban.

A diagramokat kiértékelve megállapítottam, hogy a gáztartalom CO₂-tartalmának növelése kedvező az adott ülepítési eljárás alkalmazásánál. Az optimális gáz átáramoltatás időintervalluma 12-24 óra között van, az optimális hőmérséklet-intervallum pedig 20-35 °C tartományba esik.

A füstgázok is felhasználhatóak lehetnek (CO₂ tartalmukat illetően nem optimálisak) CO₂ tartalmuk feldúsítása után a megtermelt algaszuszpenzió sűrítésére is, így energiát csökkentve az alább található vegyszeres, illetve membránszűrési technológiákhoz viszonyítva.

A technológia alkalmazhatósága felveti a szabadalmaztatás lehetőségét is.

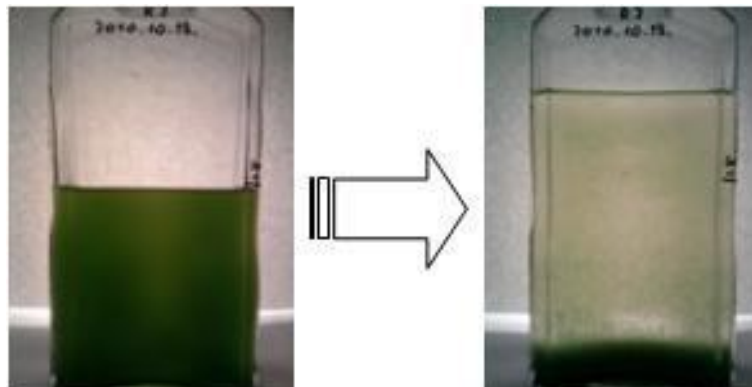
3.3. Derítési kísérletek

Az aktuálisan ülepíteni kívánt algaelegy paramétereit megmérve (pH , PCD , koncentráció) lehet megállapítani az éppen szükséges flokkulálószer, és más adalék anyagok pontos mennyiségét. Ezért a kísérletek leírásánál az adagolási mennyiség intervalluma adható meg.

3.3.1. Lúgosításos ülepítés

Chen és kollégáinak (2012) kísérletei [137] alapján végeztem ammónia alkalmazásával flokkulációs kísérleteket, de az általam mért minták esetében nem bizonyult hatásosnak az ammónia adagolása. Így adalék anyagként más vegyszer alkalmazását választottam, Jimin és munkatársainak (2013) kísérleti eredményeit szem előtt tartva, miszerint a legjobb flokkulációs aktivitást 11-es pH értéken mérték [101].

A pH érték emelést NaOH-dal végeztem. Az elegyhez NaOH (10 m/m%-os vizes oldat) adagolása a feldolgozás későbbi lépéseiben is előnyt jelent (sejtfalroncsoló hatása miatt) és csökkenti a fajlagos töltésmennyiséget is. Következésképp az első kísérletek a pH érték 10,5-11-es értékig történő emelését jelentették. A kísérletek során a frissen leszüretelt és még szaporodási fázisban lévő (I. köztes-, log fázis) algaelegyeknél kiváló pelyhesedés és megfelelő - átlagos - ülepedési sebesség (~10 mm/h) volt tapasztalható (**33. ábra, 14. táblázat**). A II. köztes és stacioner fázisban lévő algaelegy esetében hatástalannak bizonyult az eljárás, így és az ülepedési sebesség növelése érdekében plusz adalékanyagra volt szükség, amely a pelyhek kiülepedését gyorsítja.



33. ábra NaOH-dal elért ülepedés „friss” szüretnél, szaporodási fázisban

14. táblázat A pH emelése nátrium-hidroxiddal

Minta azonosító	Algatörzs	pH _{szuszpenzió} kezdeti	C _{alga} [g/dm ³]	pH _{szuszpenzió} végső	Ülepedési sebesség [mm/h]	Megjegyzés (szaporodási görbe fázisa)
AF1	31	6,8	3,6	10,3	11,00	I. köztes, log
AF2	31	7,0	3,2	10,8	10,00	I. köztes, log
AF3	31	6,8	4,4	10,1	3,60	stacioner
AF4	31	7,0	3,1	10,4	2,20	stacioner
AF5	31	7,2	3,4	10,6	1,30	elhalási
AF6	31	7,2	5,4	10,6	2,50	elhalási
AF7	MOL21	6,6	1,2	10,5	7,50	I. köztes, log
AF8	MOL21	6,8	1,4	10,2	5,50	I. köztes, log
AF9	MOL21	7,0	1,8	10,3	1,50	stacioner
AF10	MOL21	7,0	0,9	10,0	1,20	stacioner
AF11	MOL21	6,6	1,9	10,2	0,75	elhalási
AF12	MOL21	6,8	2,3	9,6	0,50	elhalási
AF13	4/d	7,4	1,6	10,7	6,40	I. köztes, log
AF14	4/d	7,2	1,2	10,6	9,60	I. köztes, log
AF15	4/d	7,2	1,8	10,8	1,60	stacioner
AF16	4/d	7,6	2,0	10,4	2,30	stacioner
AF17	4/d	7,8	1,1	10,9	1,80	elhalási
AF18	4/d	6,6	1,3	10,2	0,95	elhalási

Az ülepités során az alsó, sűrűzagy réteg nehezen alakul ki és lassan növekszik, a szuszpenziós rétegben nagy koncentrációgradiens alakul ki, a szuszpenzió és a tiszta folyadék határvonala sok esetben nem éles.

Vegyszerfogyasztása: ~ 15-20 cm³ 10 m/m% NaOH/dm³ szuszpenzió.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Az előző kísérlethez hasonlóan megvizsgáltam a szuszpenzió ammónium-hidroxidos kezelését is. A kísérlet eredményeit a **15. táblázat** foglalja össze.

15. táblázat A pH emelése ammónium-hidroxiddal

Minta azonosító	Algatörzs	pH _{szuszpenzió} kezdeti	C _{alga} [g/dm ³]	pH _{szuszpenzió} végső	Üledési sebesség [mm/h]	Megjegyzés (szaporodási görbe fázisa)
AF11	31	6,8	3,6	10,3	5,10	I. köztes, log
AF21	31	7,0	3,2	10,5	7,30	I. köztes, log
AF31	31	6,8	4,4	10,1	1,40	stacioner
AF41	31	7,0	3,1	9,4	0,90	stacioner
AF51	31	7,2	3,4	10,6	1,50	elhalási
AF61	31	7,2	5,4	10,3	1,10	elhalási
AF71	MOL21	6,6	1,2	10,5	2,50	I. köztes, log
AF81	MOL21	6,8	1,4	10,2	3,00	I. köztes, log
AF91	MOL21	7,0	1,8	9,7	1,70	stacioner
AF101	MOL21	7,0	0,9	10,0	1,40	stacioner
AF111	MOL21	6,6	1,9	9,2	0,60	elhalási
AF121	MOL21	6,8	2,3	9,7	0,75	elhalási
AF131	4/d	7,4	1,6	10,4	2,80	I. köztes, log
AF141	4/d	7,2	1,2	10,5	5,30	I. köztes, log
AF151	4/d	7,2	1,8	9,8	1,20	stacioner
AF161	4/d	7,6	2,0	10,4	1,30	stacioner
AF171	4/d	7,8	1,1	10,1	2,00	elhalási
AF181	4/d	6,6	1,3	10,3	1,20	elhalási

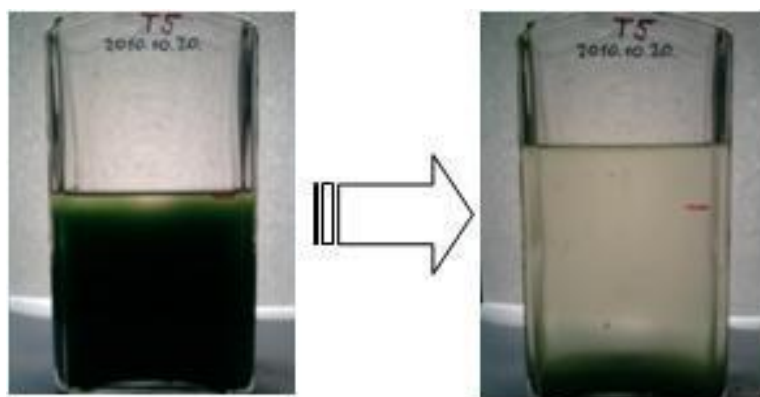
Itt is hasonló jelenséget tapasztaltam, mint a nátrium-hidroxidos kezelésnél, fajlagos vegyszerfogyasztása: ~ 55-60 cm³ 10 m/m% NH₄OH/dm³ szuszpenzió.

Ezek az értékek kb. háromszor nagyobbak, mint a nátrium-hidroxidos kezeléshez szükséges fajlagosak, kisebb üledési sebesség mellett.

3.3.2. Lúgosítási ülepítés adalékkal

A NaOH-al történő *pH* beállítás mellett olyan anyagot adagoltam az oldathoz, amely segíti, meggyorsítja a pelyhek koagulációját és leülepedését. Rawat és kollégái (2013) alumínium-szulfát és vas-klorid vegyületeket használtak fel az üledék intenzifikálására [14], Jimin és munkatársai (2013) pedig kalcium-klorid és vas-klorid oldatokat alkalmaztak [101]. Előkísérleteim révén a fentiekén túl vas(III)-szulfát oldatot találtam a legalkalmasabbnak a mintáim üledései sebességének intenzifikálására.

Vas(III)-szulfátot (40 m/m%) adagolva (adagolás koncentráció és *pH* függvényében 3 – 6 ml $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3/\text{dm}^3$ algaelegy) a lúgosított oldathoz azt tapasztaltam, hogy ez segíti a pelyhesedés folyamatát, valamint egy gyors üledék (~1 m/h=1000 mm/h) után, tömör algaréteg képződik az elegy alján. (Az adalék anyagokkal elvégzett kísérletek adatait a 3.3.4. fejezet végén található **16. táblázat** összegzi.) A kiváló üledék ellenére tovább kellett folytatnom a kísérletet, hiszen a vas bevétele megnehezíti a későbbi műveleti lépések analitikáját és feldolgozást.



34. ábra NaOH-dal+ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -al elért üledék

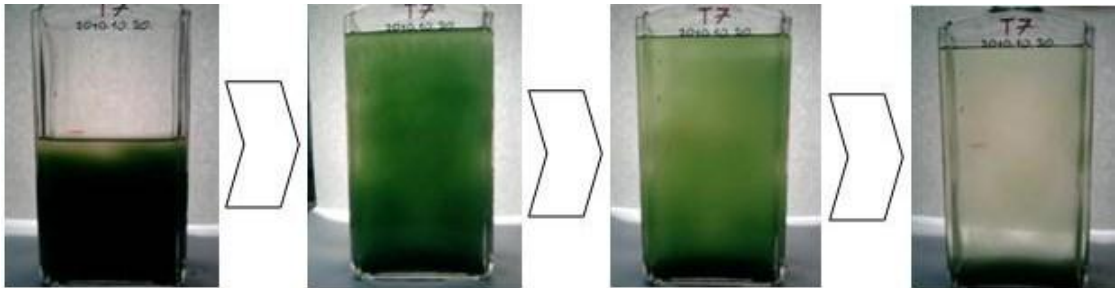
3.3.3. NaOH és kationos flokkulálószer addíció

Rawat és kollégái (2013) kationos polimer vegyületek (polielektrolitok) alkalmazásával megfelelő intenzifikálást értek el kutatásaik során [14]. Ennek alapján a rendelkezésemre álló kationos flokkulálószerrel próbáltam növelni az eddig elért üledései sebességet.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

A $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -ot *Poly-DADMAC* kationos flokkulálószerre cseréltem. A *Poly-DADMAC* adagolása a *PCD* mérések függvényében, $C_{P-DADMAC} = 2,4 \text{ g/dm}^3$ esetén: 60 – 100 ml *Poly-DADMAC*/1 dm^3 algaelegy.

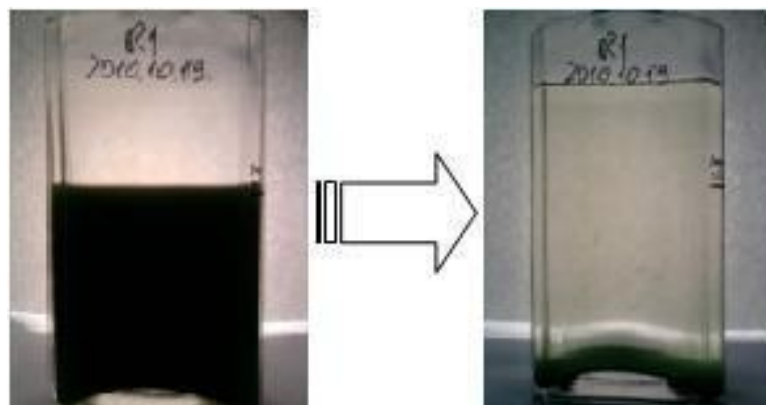
A kísérletek során az ülepedés sebessége jóval kisebb értékű, fele akkora ($\sim 0,5 \text{ m/h} = 500 \text{ mm/h}$) volt, mint $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ esetében.



35. ábra NaOH-dal+kationos flokkulálószerrel elért ülepedés

3.3.4. NaOH, kationos flokkulálószer és $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ adagolása

Az ülepedési sebesség növelésére a két vegyszert együtt adagoltam. A lúgosított oldathoz kevesebb flokkulálószerrel adagoltam (az előző kísérletben használt mennyiségekhez képest kb. 35 %-kal \Rightarrow 39 – 65 ml *Poly-DADMAC*/ 1 dm^3 algaelegy) és jóval kevesebb $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -ot (előzőekhez képest kb. 60 %-kal \Rightarrow 1,2 – 2,4 ml $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ [40 m/m%]/1 dm^3 algaelegy). Az eredmény rendkívül látványos volt, kiváló pelyhesedéssel és megfelelő ülepedési sebességgel ($\sim 1,3 \text{ m/h} = 1300 \text{ mm/h}$).



36. ábra NaOH-dal+kationos flokkulálószerrel+ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -dal elért ülepedés

16. táblázat A pH emelése + adalékanyagok hatása

Minta azonosító	Alga-törzs	pH_{szuszpenzió} kezdeti	C_{alga} [g/dm³]	pH_{szuszpenzió} végső	Ülepedési sebesség [m/h] + adalékanyag	Megjegyzés (szaporodási görbe fázisa)
AF12	31	6,8	3,6	10,5	1,70 vas(III)-szulfát	I. köztes, log
AF22	31	7,0	3,2	10,3	0,63 DADMAC	I. köztes, log
AF32	31	6,8	4,4	10,8	2,00 vas(III)-szulfát	stacioner
AF42	31	7,0	3,1	10,2	0,55 DADMAC	stacioner
AF52	31	7,2	3,4	10,4	1,30 vas(III)-szulfát	elhalási
AF62	31	7,2	5,4	10,9	0,33 DADMAC	elhalási
AF72	MOL21	6,6	1,2	9,7	1,20 vas(III)-szulfát	I. köztes, log
AF82	MOL21	6,8	1,4	10,4	0,58 DADMAC	I. köztes, log
AF92	MOL21	7,0	1,8	10,3	0,85 vas(III)-szulfát	stacioner
AF102	MOL21	7,0	0,9	10,6	0,68 DADMAC	stacioner
AF112	MOL21	6,6	1,9	10,9	1,20 vas(III)-szulfát	elhalási
AF122	MOL21	6,8	2,3	9,7	0,41 DADMAC	elhalási
AF132	4/d	7,4	1,6	10,4	0,56 DADMAC	I. köztes, log
AF142	4/d	7,2	1,2	10,1	1,00 vas(III)-szulfát	I. köztes, log
AF152	4/d	7,2	1,8	10,3	0,45 DADMAC	stacioner
AF162	4/d	7,6	2,0	9,7	0,86 vas(III)-szulfát	stacioner
AF172	4/d	7,8	1,1	10,5	0,41 DADMAC	elhalási
AF182	4/d	6,6	1,3	10,8	1,30 vas(III)-szulfát	elhalási
AF192	31	7,2	2,8	10,3	1,70 DADMAC, vas(III)-szulfát	I. köztes, log
AF202	31	6,6	3,6	10,7	1,20 DADMAC, vas(III)-szulfát	elhalási
AF212	MOL21	6,8	1,1	10,1	1,60 DADMAC, vas(III)-szulfát	stacioner
AF222	MOL21	6,4	1,5	10,2	0,60 DADMAC, vas(III)-szulfát	stacioner
AF232	MOL21	8,0	0,8	10,5	1,80 DADMAC, vas(III)-szulfát	stacioner
AF242	4/d	6,2	1,7	10,4	0,70 DADMAC, vas(III)-szulfát	stacioner
AF252	4/d	6,8	2,8	10,8	1,10 DADMAC, vas(III)-szulfát	elhalási
AF262	4/d	7,7	2,3	10,2	1,80 DADMAC, vas(III)-szulfát	stacioner
AF272	31	7,2	0,9	10,3	1,60 DADMAC, vas(III)-szulfát	I. köztes, log

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Látványos a flokkok kialakulása, az ülepítés során az alsó, sűrűzagy réteg gyorsan kialakul és gyorsan növekszik, a szuszpenzió és a tiszta folyadék határvonala a legtöbb esetben éles. Vegyszerfogyasztása: ~ 500 mg 40 m/m% vas(III)-szulfát/dm³ szuszpenzió, és ~ 200 mg (C_{P-DADMAC} = 2,4 g/dm³) Poly-DADMAC /dm³ szuszpenzió.

3.3.5. Ülepedési sebesség növelése a pH csökkentésével

A feldolgozott szakirodalom alapján a pH-csökkentéssel előidézett ülepítést is megvizsgáltam. Vegyszerként sósavat és salétromsavat alkalmaztam (oldatkoncentrációk: 0,1 mol/dm³ vizes oldatok), a szuszpenziók térfogata pedig 100 cm³ volt. Az eredményeket a **17. táblázat**ban foglaltam össze.

17. táblázat A pH-csökkentése sósavval, salétromsavval

Minta azonosító	Algatörzs	pH _{szuszpenzió} kezdeti	C _{alga} [g/dm ³]	pH _{szuszpenzió} végső	Ülepedési	Megjegyzés (szaporodási görbe fázisa)
					sebesség [mm/h] + adalékanyag megnevezés	
AF13	31	6,8	3,6	4,1	28 sósav	I. köztes, log
AF23	31	7,0	3,2	3,5	42 salétromsav	I. köztes, log
AF33	31	6,8	4,4	3,7	33 sósav	stacioner
AF43	31	7,0	3,1	4,3	25 salétromsav	stacioner
AF53	31	7,2	3,4	3,5	48 sósav	elhalási
AF63	31	7,2	5,4	3,9	73 salétromsav	elhalási
AF73	MOL21	6,6	1,2	3,3	84 sósav	I. köztes, log
AF83	MOL21	6,8	1,4	4,2	45 salétromsav	I. köztes, log
AF93	MOL21	7,0	1,8	4,1	37 sósav	stacioner
AF103	MOL21	7,0	0,9	3,5	79 salétromsav	stacioner
AF113	MOL21	6,6	1,9	3,9	45 sósav	elhalási
AF123	MOL21	6,8	2,3	3,7	55 salétromsav	elhalási
AF133	4/d	7,4	1,6	4,1	42 sósav	I. köztes, log
AF143	4/d	7,2	1,2	4,3	31 salétromsav	I. köztes, log
AF153	4/d	7,2	1,8	3,7	53 sósav	stacioner
AF163	4/d	7,6	2,0	3,9	47 salétromsav	stacioner
AF173	4/d	7,8	1,1	4,3	35 sósav	elhalási
AF183	4/d	6,6	1,3	4,2	30 salétromsav	elhalási

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

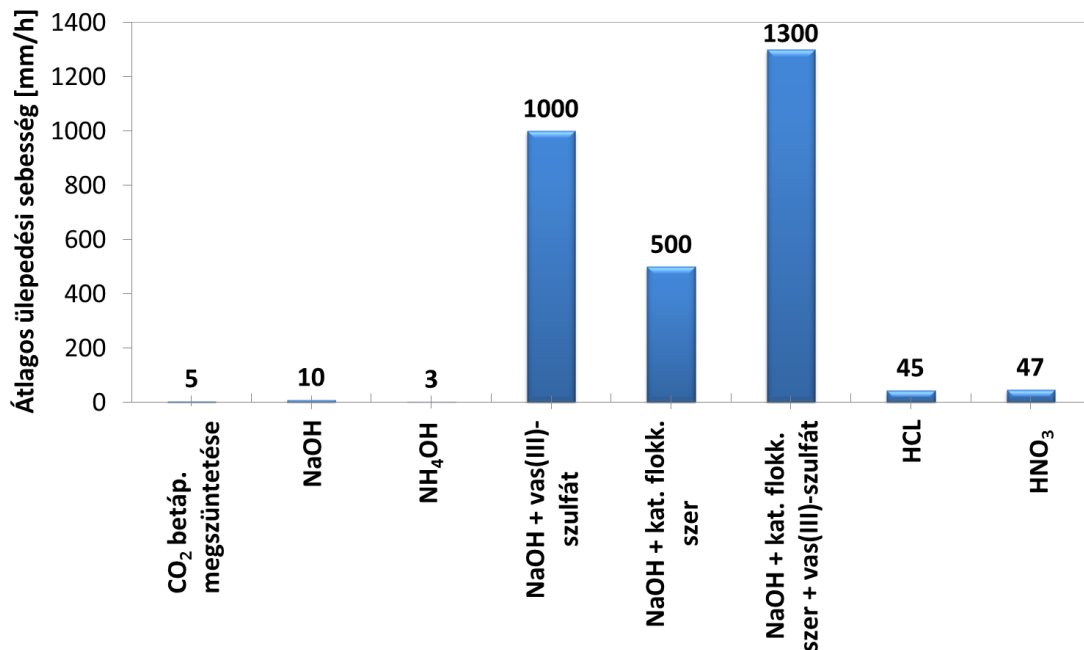
Az ülepítés során az alsó, sűrű zagy réteg nehezen alakul ki és lassan növekszik, a szuszpenziós rétegben nagy a koncentráció gradiens, a szuszpenzió és a tiszta folyadék határvonala gyakran nem éles. Vegyszerfogyasztása: 30-40 cm³/dm³ szuszpenzió.

A 10,5-es *pH* beállítása mellett a **18. táblázatban** látható koncentráció intervallumok között lehet megfelelően ülepíteni az algaelegyeket.

18. táblázat Kationos flokkulációszerre és Fe³⁺ ionra vonatkoztatva az optimális koncentráció intervallumok

Alsó koncentráció intervallum [g/dm ³]	Adalékanyag	Felső koncentráció intervallum [g/dm ³]
9*10 ⁻²	Poly-DADMAC	1,5*10 ⁻¹
5,2*10 ⁻¹	Fe ³⁺	1

A vegyszeres flokkulációs kísérletek összehasonlító diagramját a **37. ábra** szemlélteti.



37. ábra Kémiai flokkulációs kísérletek eredménye

Az optimálisan alkalmazható flokkulációszer keverék összetételét definiáltam (NaOH (10 m/m%) + *Poly-DADMAC* ($C_{P-DADMAC} = 2,4$ g/dm³) + Fe₂(SO₄)₃ (40 m/m%)), vegyszerigényét minimalizáltam (10 -11-es *pH*-ig NaOH + 39 – 65 ml *Poly-DADMAC* + 1,2 – 2,4 ml Fe₂(SO₄)₃ / 1 dm³ algaelegy).

3.4. Membránnal történő sűrítési kísérletek

Kísérleteimet a következőképpen végeztem: Amikor a mikroszűrési kísérlethez kellő mennyiségű algaszuszpenziót szüreteltem, akkor azt 40 dm³-es részletekben az mikroszűrőbe adagoltam, és 20 dm³-re sűrítettem be. Ezek után először csapvizet, majd desztillált vizet alkalmaztam, az anyagcsere-termékek és maradványsók eltávolítása érdekében. A következő 40 dm³-es egységet is a fent leírt módon sűrítettem be, majd hozzáadtam az előző ciklus mosott sűrítményét is.

A sűrítés kezdetén és végeztével egyaránt szárazanyag-tartalom meghatározást végeztem. A sűrített szuszpenzió tisztaságát vezetőképesség-méréssel követtem nyomon, a mosás alatt többször is mintát véve a permeátumtartályból. A vezetőképesség-mérés alkalmas módszer erre a célra, mivel a tápoldatban levő ionok mozgékonyasága igen nagy, így könnyen mérhető, és - nem mellesleg - gyors is az analízis. A kísérletsorozatot a termelési kapacitással elérhető koncentrációs faktorig folytattam, a mosást pedig a lehető legkisebb vezetőképesség-értékig, illetve a már három tizedes jegyben nem mérhető szárazanyag-tartalomig végeztem. A kísérlet során hét sűrítési szakasz (*MF*) alatt 280 dm³ szuszpenziót sikerült 20 dm³-re sűríteni, ami azt jelenti, hogy az mikroszűrésre jellemző sűrítési faktor értéke $CF_{végső} = 14$ -nek adódott.

A készülék főbb paramétereinek beállítása a **19. táblázatban** találhatóak.

19. táblázat Készülékbeállítások

	Mikroszűrés	Visszamosás
Térfogatáram [l/h]	25	25
Időtartam [sec]	600	60
Nyomáskülönbség [bar]	0,10 - 0,50	0,15 - 0,50

A sűrítő tartályba töltött szuszpenziót a levegőkompresszor nyomócsőjének leágazása által táplált porlasztó segítségével pneumatikusan kevertetem. A továbbiakban a folyadékszint lehetőség szerinti legkisebb ingadozása érdekében 1 dm³-es menzúra segítségével történt a mintautánpótlás.

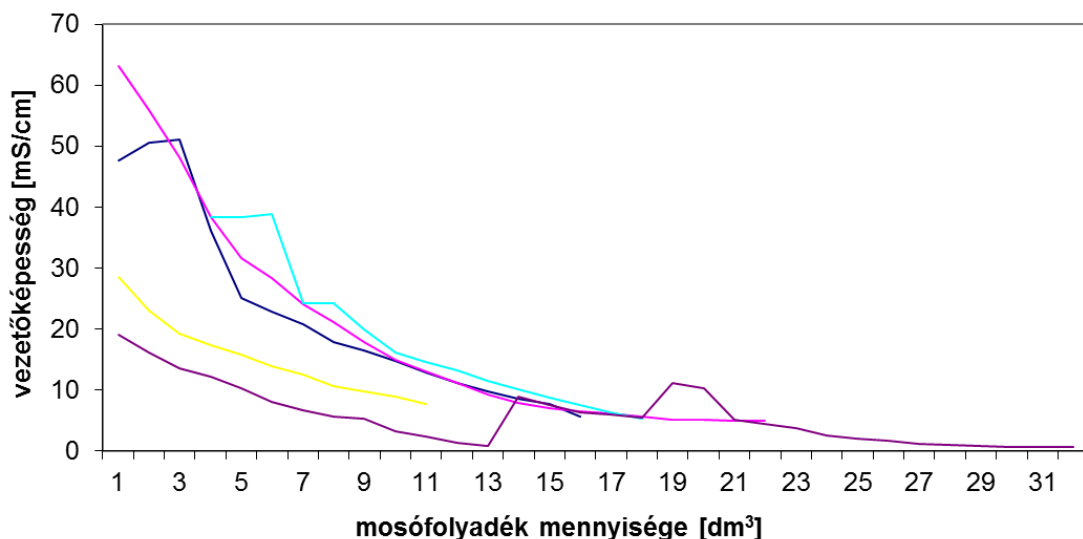
Annak érdekében, hogy a rendelkezésre álló mintamennyiség feldolgozásával a lehető legnagyobb számú adatot gyűjtsen, a mérést több szakaszra bontottam. Az algaszuszpenziókat 40 dm³-es adagokban vettem el a foto-bioreaktorokból a szűrés megkezdéséhez.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Miután a 40 dm³-es térfogatot 20 dm³-be sűrítettem (*MF1*), desztilláltvizes atmoszfért alkalmaztam. Az atmoszfért addig végeztem, míg a szuszpenzióban lévő maradványsókat valamint az egyéb szerves anyagokat, anyagcseretermékeket el nem távolítottam. A következő 40 dm³ algaszuszpenziót, az előzőekben leírt módon sűrítettem be, amit az *MF2* kóddal jelöltem. A fentiekben leírt vizsgálatokat a kísérleteim során 7 alkalommal végeztem el (*MF1 – MF7*).

A szűrés komplex vizsgálata érdekében az adott lépésben nyert sűrítményhez hozzáadagoltam az előző besűrítésből származó töményített, atmoszfért koncentrátumot. Az *MF2* kísérlet végén az *MF1* sűrítési vizsgálatból származó retentátumot, sűrítményt ráadagoltam az *MF2* végére, így a két sűrítési vizsgálatból 3 kísérleti pont áll elő (*MF1*, *MF2*, *MF1+MF2*). Az *MF3* kísérlet végeztével ráadagolásra került az *MF1+MF2* sűrítmény és így tovább, így a 7 mérési pont helyett 13 pontban vizsgálhattam meg a rendszer viselkedését, 7 darab „alap” sűrítést és emellett 6 darab nagyobb koncentrációjú sűrítési lépést. A fent leírt kísérletütemezés következtében, mind a membrán, mind pedig a szűrés közben kialakult viszonyok összetettebb elemzésére nyílt lehetőségem.

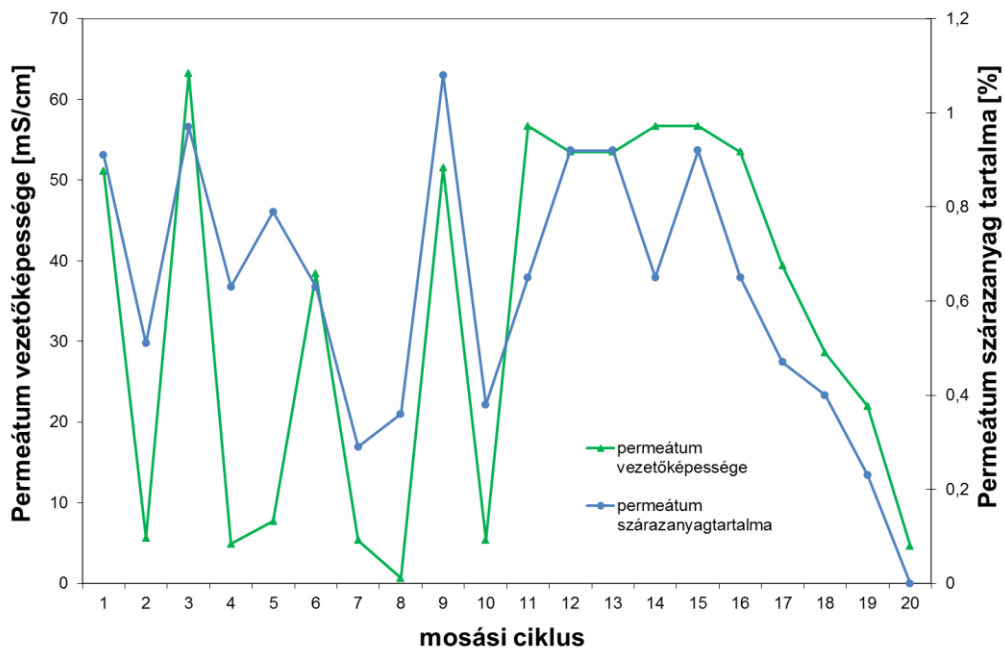
A fent leírtak szerint előállt koncentrátumokat minden esetben desztilláltvizes mosásnak vettem alá, hogy a permeátum vezetőképessége minél inkább konvergáljon a desztillált víz vezetőképességéhez (**38. ábra**).



38. ábra Egy-egy mosási ciklus permeátum áramának vezetőképessége a mosás folyamán

Az átmosás révén lehetőség nyílik arra, hogy száraz anyagként csupán a mikroalgasejteket nagy koncentrációban tartalmazó desztvizes szuszpenziót vizsgáljam, kezeljem tovább. Az átmosás következtében újabb kedvező tulajdonságok is megmutatkoztak az előállt retentátumnál, mint például könnyebb tárolhatóság (később indulnak meg a bomlási folyamatok), gyorsabb bepárolhatóság.

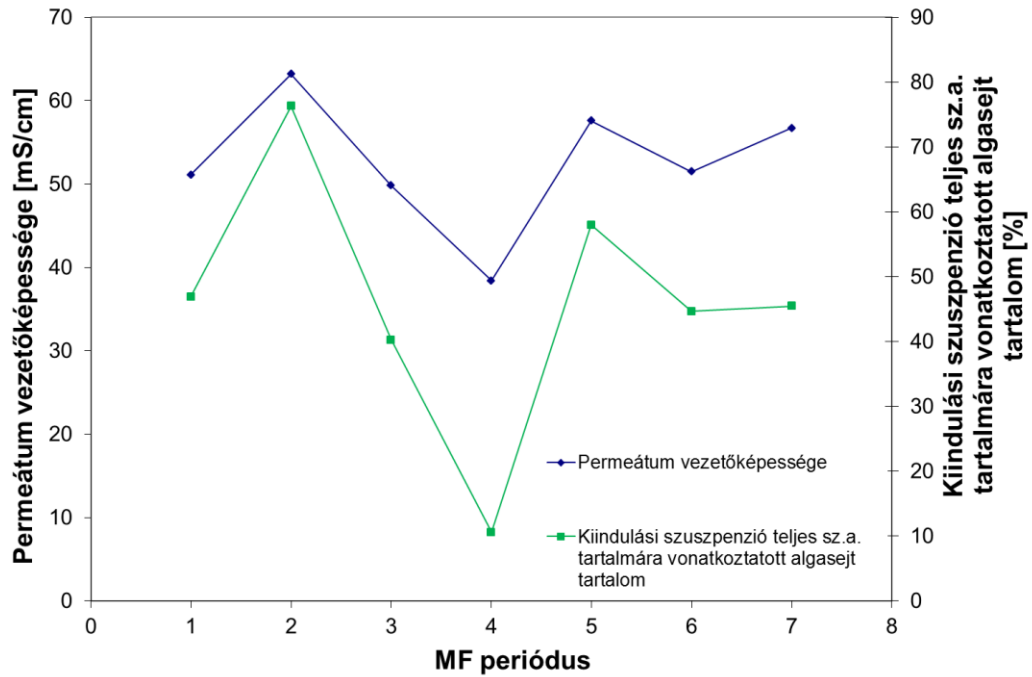
A permeátum szárazanyag-tartalom változása és a hozzá tartozó vezetőképesség változás trendje az esetek többségében azonos volt (**39. ábra**).



39. ábra A sűrítmény átmosásának hatása a permeátum áramra

A 5,7,11-15 mosási ciklusokban tapasztalt eltéréseket a kiindulási szuszpenziók minőségének a többitől való eltérése okozza. Ezeket akkor szüreteltem, amikor a szaporodási indexük csökkenő tendenciát mutatott (elhalási fázisból kerültek ki).

A **40. ábra** az egyes szűrési kísérletek esetében mutatja meg a kiindulási szuszpenzió összes szárazanyag-tartalmára vonatkoztatott algasejt-tartalom és permeátum-vezetőképesség összefüggéseit.



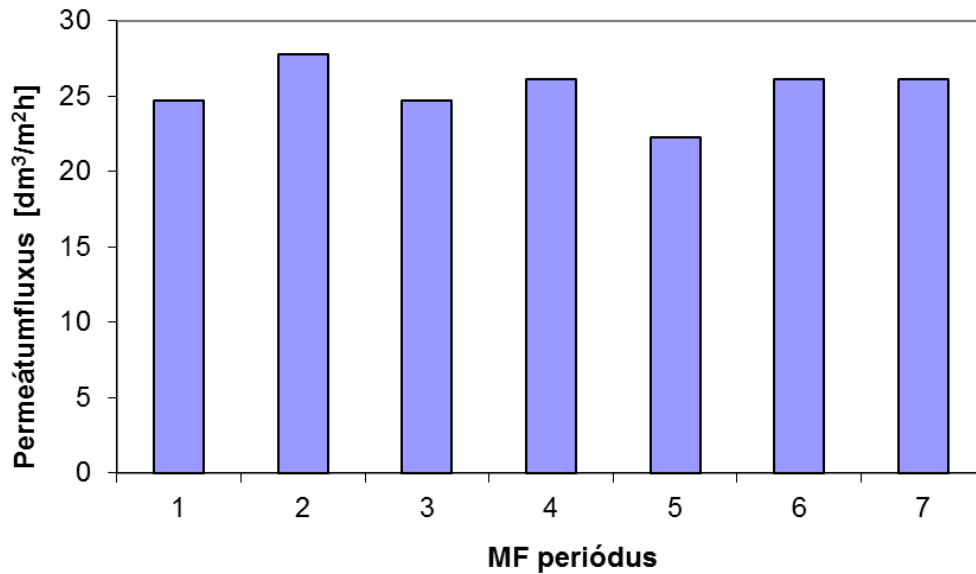
40. ábra Az egyes szűrési kísérletek esetében mért kiindulási szuszpenzió összes szárazanyag-tartalmára vonatkoztatott algasejt-tartalom és permeátum-vezetőképesség összefüggései

Az adatok a szűrési periódusok megkezdésekor lettek begyűjtve, mind a kiindulási szuszpenzióból, mind pedig a kezdetben kilépő permeátumból. Az ábra határozott tendenciát és kapcsolatot mutat meg, a membrán két oldalán mért mennyiségek között. Eddigi méréseim alapján egyértelmű kapcsolat van a besűríteni kívánt algaszuszpenzió összes szárazanyag tartalmának algasejt-tartalma és a permeátumban mérhető vezetőképesség között. Nagyobb algakoncentráció nagyobb kiindulási vezetőképességet eredményez.

A permeátum jellemzésére szolgáló **6. egyenlet** a következő **21. egyenletben** felírtak szerint is kiszámítható a gyakorlatban mért adatok alapján.

$$J = \frac{V_p}{A \cdot \tau} \quad (21)$$

Ahol J a permeátum teljes fluxusa [$\text{dm}^3/\text{m}^2\text{h}$], V_p a permeátum teljes térfogata [dm^3], A a membrán felülete [m^2], τ a szűrés időtartama [h]. Ezen egyenletben foglaltak szerint mutatom be a szűrletfluxus (permeátum fluxus) értékeinek alakulását a **41. ábrán**.



41. ábra Szűrletfluxus (permeátum fluxus) értékeinek alakulása a különböző szűrési periódusokban

A permeátum fluxus-értékei minden mérésem esetén (*MF1 – MF7*) hasonló értékűnek adódott. Különböző koncentrációjú, összetételű szuszpenziókat azonos teljesítménnyel tudtam szűrni a készülékemmel a vizsgált tartományokban.

A Baerdemaeker és kollégái (2013) által (nagy algakoncentrációs értékeken) mért fluxus (20-40 l/m²h) adataik összemérhetőek az általam mért értékekkel [159].

Discart és kollégái (2013) ugyan nagyobb fluxusértéket állapítottak meg, (51 l/m²h), ám ez az érték folyamatos csökkenést mutatott, és egy óra elteltével 12 l/m²h értéket ért el, ezt átlagolva egy órára 31,5 l/m²h értéknek adódik, ami némileg nagyobb mint az általam mért érték, de azzal összemérhető [156].

Duu-Jong és kollégái (2012) nagyságrendekkel nagyobb fluxus-értékeket közöltek, mint általában a publikációk, de ez a nagy érték csak az első pár percben volt tartható [157].

Baerdemaeker és munkatársai (2013) az általam vizsgált algafajhoz hasonló morfológiájú algaszuszpenziójukat (8,4 g/dm³-es algakoncentrációval) 20 l/m²h fluxussal tudták szűrni [159]. Kísérleteim ennek tükrében eredményesnek mondhatóak, mivel az általam mért adatok többségében nagyobb értékek (átlagosan 25 l/m²h).

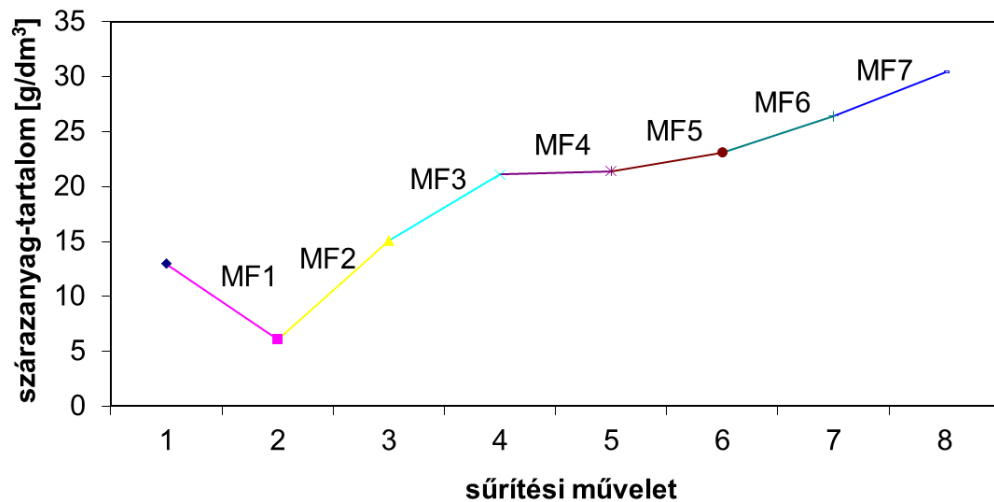
Bilad és munkatársai (2012) 45-50 l/m²h fluxusértékeket is mértek az első ciklusú szűréseiknél, ám ehhez nagy nyomásértékek tartoztak (mint hajtóerő) [155] (ami az általam használt membránmodulnál nem megengedhető).

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

A második és harmadik szűrési ciklusaikban mért értékek csökkenést mutattak (második ciklus: 30-40 l/m²h, harmadik ciklus: 10-15 l/m²h [155]), és ezzel összevetve, igaz, hogy az általam mért fluxus kisebb érték, mint az ő első két ciklusukban volt, de ez az érték a ciklusszámtól függetlenül tarthatónak bizonyult.

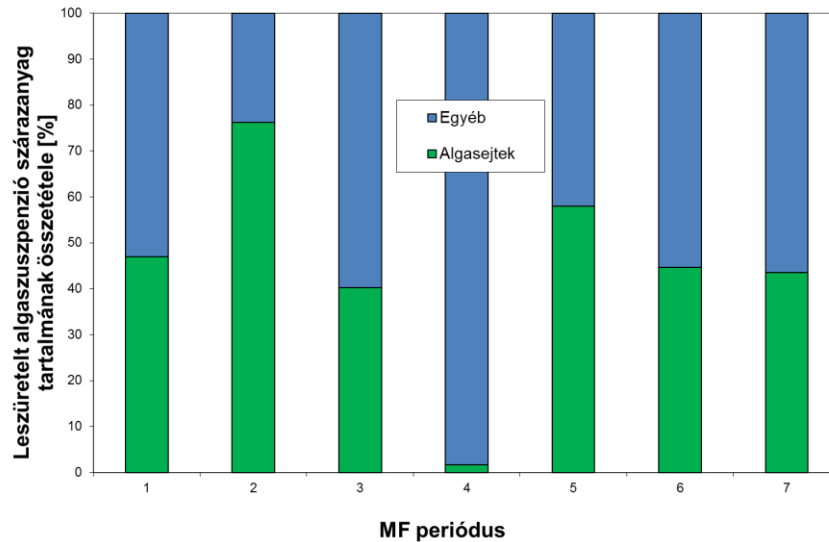
A ZW-10-es membránmodullal, hét sűrítési szakasszal 280 dm³ ráadagolt algaszuszpenziót 20 dm³-re sűrítettem, így a végső koncentrációs faktor $CF_{végső}=14$.

A sűrítmény szárazanyag-tartalmának változását a kísérlet során a **42. ábra** foglalja össze.



42. ábra A sűrítmény szárazanyag-tartalmának változása a sűrítési és mosási műveletek során

Az első szakaszban a sűrítmény szárazanyag-tartalmának csökkenését a mosás okozza. Ebből jól látható, hogy a leszedett algaszuszpenzió szárazanyag-tartalmának körülbelül 50 %-át a maradványsók, illetve egyéb szerves vegyületek és anyagcsere-termékek teszik ki (**43. ábra**).



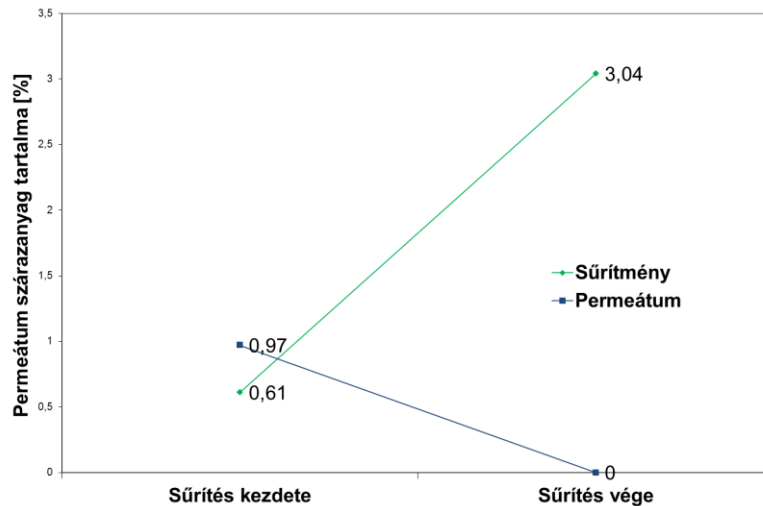
43. ábra Leszűretelt szuszpenziók szárazanyag-tartalmának összetétele algasejtekre vonatkoztatva

A **43. ábra** második *MF* periódusában egy természetes körülmények között működő foto-bioreaktor egységből származó szuszpenzió feldolgozásának eredményeként kaptam a teljes száraz-anyagra vonatkoztatott magas alगतartalmat. További összefüggések deríthetők fel, ha különböző reaktoregységből [törzsoldat vizsgáló készülék (*TV*), sokkoló/érlelő reaktor (*SR*), algalabor reaktor (*R*), tető reaktor (*TR*)], más-más szaporodási fázisból származó mintát is megvizsgálom. Ezek a vizsgálatok lehetővé teszik, hogy további következtetéseket vonjak le a természetést és érlelést illetően, továbbá, hogy ezeket a tapasztalatokat a későbbiekben a természetéstechológiába beépíthessem, ezzel is növelve a biomassza - és/vagy lipid - kapacitást. A kezdeti, leszűretelt algaszuszpenzió (40 dm^3) 13 g/dm^3 -es összes szárazanyag tartalomról (algasejtek, az őket kísérő anyagcseretermékekkel, maradványsókkal, stb.), $12,2 \text{ g/dm}^3$ -es szárazanyag tartalomra (20 dm^3 tisztán algasejt) lett besűrítve (*MF1*). Mivel az átmosott sűrítmény már csak a számunkra fontos algasejteket tartalmazza (elhanyagolható mennyiségben van benne egyéb anyag), az összes szárazanyag tartalma megegyezik a tényleges biomassza koncentrációjával.

Ezt a megállapítást a későbbi feldolgozási műveletek (szűrés, szárítás, extrakció) is alátámasztották.

A végső algasűrítmény $30,4 \text{ g/dm}^3$ koncentrációval rendelkezik mikroalgára nézve, 20 dm^3 -es térfogatban (7 besűrítési lépés után). Tehát a szárazanyag-tartalmat sikerült $\sim 0,61 \%$ -ról (szennyezőkkel $1,22 \%$ -ról) $3,04 \%$ -ra emelnem a művelet során (**44. ábra**).

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -



44. ábra A sűrítmény és permeátum anyag tartalma a kísérlet során

Bilad és munkatársai (2012) 20 %-os sűrítményt értek el [155], ami az általam mért érték többszöröse. Meg kell jegyezni, hogy az általam mért érték, nem a használt membránomra jellemző határérték, hanem a termelési kapacitásunkhoz igazodó számadat.

Duu-Jong és kollégái (2012) 34 %-os sűrítményt értek el [157, 177], ami szintén alátámasztja az előzőekben leírtakat, miszerint a membránmodult a rendelkezésre álló algaszuszpenzió mennyisége miatt nem dolgoztattam a határérték közelében (ezt támasztják alá a stabilan és folyamatosan mérhető permeátum fluxus értékeim is **F24.**).

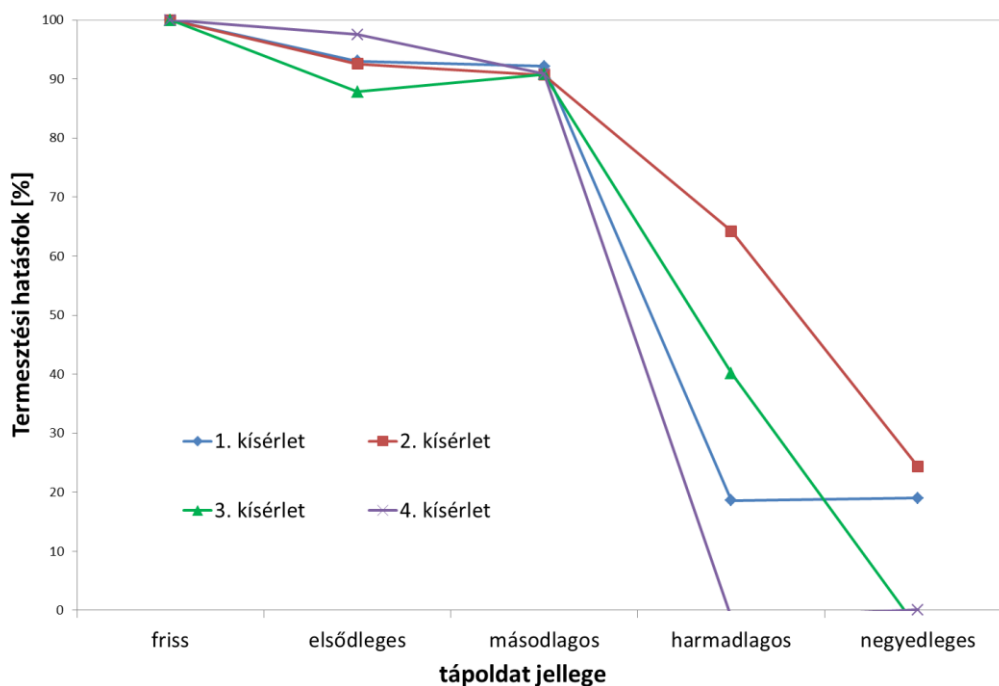
3.4.1. A permeátum termesztésbe való visszaforgatása

A sűrítés során nyert permeátum termesztésbe való vizsgálatát is elvégeztem. A frissen leszedett permeátumot kiegészítettem a tápoldat összetételéhez megfelelően, mind makro-, mind pedig mikroelemekkel. Az így elkészült tápoldatot előzőleg vizsgált algakultúrával beoltottam. Ezek után kikerült a természetes környezetben installált foto-bioreaktorainkba és vizsgáltam a szuszpenzióban az algakultúra koncentrációját (termesztőképességét).

Vizsgálataim során a friss tápoldattal való felszaporítást tekintettem a termesztés 100 %-os hatásfokának. Kísérleti paramétereimet a következő módon végeztem: egy hetes termesztési ciklusban, átlagosan 1 g/dm^3 koncentrációjú szuszpenzióból kiindulva termesztettem a szabadtéri reaktor egységeiben, így kiküszöbölve az időjárás és egyéb tényezők közvetlen hatását.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

A kezdeti és leszűretelt algaszuszpenziókból mintát vettem, és Whatman típusú, 2,5 µm részecskevisszatartású szűrőn átszűrtem, átmostam, majd 105 °C-on tömegállandóságig szárítottam és analitikai pontossággal bemértem a tömegét. Az így kapott koncentrációkból különbséget képeztem: a leszűretelt, végső koncentrációból kivontam a kiindulást, és így megkaptam a kísérlet alatti tényleges szaporulatot [g/dm³/hét]. A kísérleti mérések összefoglaló táblázatát az **F25. függelék** tartalmazza. A friss tápoldaton termesztett szuszpenzióról leszűrt permeátumot kiegészítettem, hogy annak makro- és mikroelem összetétele biztosan megfeleljen az indulási tápoldat összetételének. Az így előállt másodlagos tápoldatot beoltottam, hogy indulási koncentrációja ~ 1 g/dm³ értékű legyen. Párhuzamos kísérletek esetében ugyan ilyen módon jártam el. Az egy hetes felszaporítást követően megismételtem a fent leírtakat és így egy harmadlagos tápközeggel végeztem kísérleteimet. A kísérletek záró pontjaként a párhuzamos, friss tápoldatos szuszpenzióhoz viszonyított minimálisan 10 %-os termesztési határfok-romlást tűztem ki. Amikor a határfok romlás meghaladta a 10 %-ot, akkor a permeátumot többször már vissza nem forgathatóknak tekintettem. Permeátum visszaforgathatósági kísérleteim eredményeit a **45. ábra** szemlélteti.



45. ábra Permeátum visszaforgathatóságának vizsgálata

A kísérletek eredményein jól látható, hogy a permeátum kétszeri (az elsődleges és a másodlagos tápoldatok használata) visszaforgatása a termesztésbe 90 %-os határfok feletti értékekkel lehetséges.

A harmadlagos tápoldatok nem mutatkoztak megbízható termesztő közegnek, instabil volt a szuszpenzió. A negyedleges alkalmazhatóság vizsgálata egyértelműen negatív eredményeket adott.

Castrillo és munkatársai (2013) publikációjukban csak egyszeri visszaforgatást vizsgáltak [105]. Eredményesnek mondhatom permeátum alapon történő szaporítási kísérleimet, mivel azok bizonyították a permeátum kétszeri visszaforgathatóságát, 90 %-os felszaporítási határfok felett.

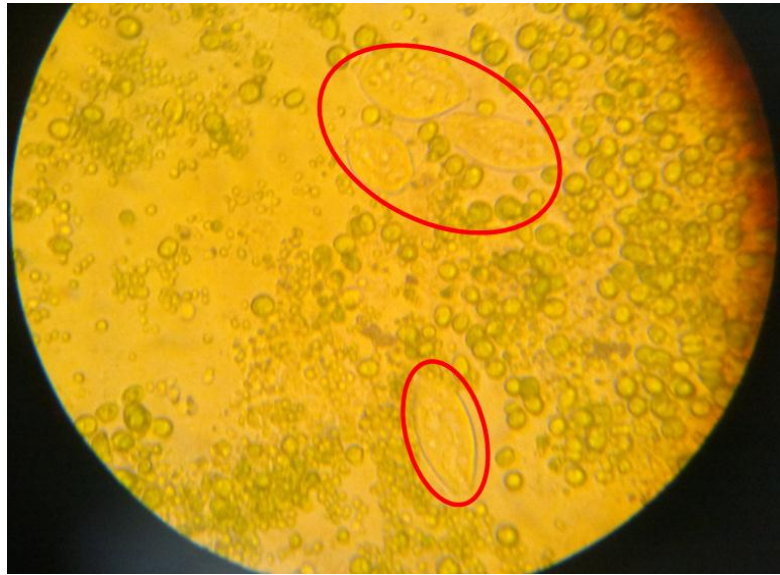
Ily módon az egy hetes kísérleti ciklusokba, három héten keresztül nem kellett friss vizet bevinni. Ez azt jelenti, hogy (esetemben) 200 dm³ friss víz bevitele elegendő volt a három ciklusban történő termesztéshez, míg a permeátum visszaforgatása nélkül ez az érték heti 200 dm³, azaz 600 dm³ friss víz fogyasztását jelentette volna. Biztató adatok azokra a területekre, ahol nem áll rendelkezésre megfelelő víz utánpótlás a technológia táplálására.

3.4.2. Algák tárolás közbeni életképességének vizsgálata

Az algák tárolás közbeni életképességét a következők szerint vizsgáltam. A mintákat minden esetben 20 dm³-es polietilén kannába töltöttem be. A fotobioreaktoraink üzemeltetési tapasztalatai alapján a jó kondícióban lévő indítókultúrákkal sikeres termesztést lehet indítani.

Jó kondícióban lévőknek minősítem azt az algakultúrát, amelyet legkésőbb a kultúra életciklusának 5. fázisából (lag-, I. köztes-, log-, II. köztes-, stacioner fázis) szüreteltem. *pH* értéke 7-8,5 közötti. Spektrumában intenzíven megjelenik a szintestekre jellemző 680 nm-es fényabszorbancia-csúcs. Érzékszervi vizsgálatok alapján színe zöld, nem lehet a bomló algára jellemző záptojásra jellemző szagú. Mikroszkópos felvételein az algasejtek mellett nem láthatóak egyéb organizmusok.

A szuszpenzióban idegennek tekinthető organizmusok (**46. ábra**) megjelenése és elszaporodása a szuszpenzióban jelenlévő algafaj/algapopuláció egyértelmű hanyatlására utal.



46. ábra Rossz kondícióban lévő algaszuszpenzió mikroszkópos vizsgálata, ahol a piros körök „idegen” organizmusok jelenlétét mutatják

Tapasztalataim szerint a leszüretelt algát, laboratóriumban 20 °C-on legkésőbb 3 napon belül fel kell dolgozni. Ezt követően megjelennek a minőségromlás jelei, nehezen ülepedő, nehezen szűrhető szuszpenzió, kellemetlen záptojásra emlékeztető szag, algakoncentráció csökkenése.

Minél magasabb a tárolási hőmérséklet, annál hamarabb indulnak be a bomlási folyamatok. A hűtés (5-10 °C-on történő tárolás) meghosszabbítja az eltarthatóságot, kisebb térfogatok (1-20 dm³) esetén ez célszerűnek tűnik, de nagyobb térfogatok hűtve tárolásának energetikai vonatkozásait is számításba kell venni.

Elsőként a CO₂-dal történő tartósítás lehetőségét vizsgáltam. A 10 dm³ frissen szüretelt algaszuszpenzió élelmiszeripari minőségű szén-dioxidot buborékoltattam át. A buborékoltatást addig folytattam, amíg a gázteret maradéktalanul át nem öblítettem. A CO₂-os kezelést 3-4-szer ismételt meg a szuszpenzió telítéséig.

A szuszpenzió bomlása a tapasztalatok szerint csak 5-7 nap után kezdődött el. Ennek megfelelően a tárolás időtartamának ennél rövidebbnek kell lennie.

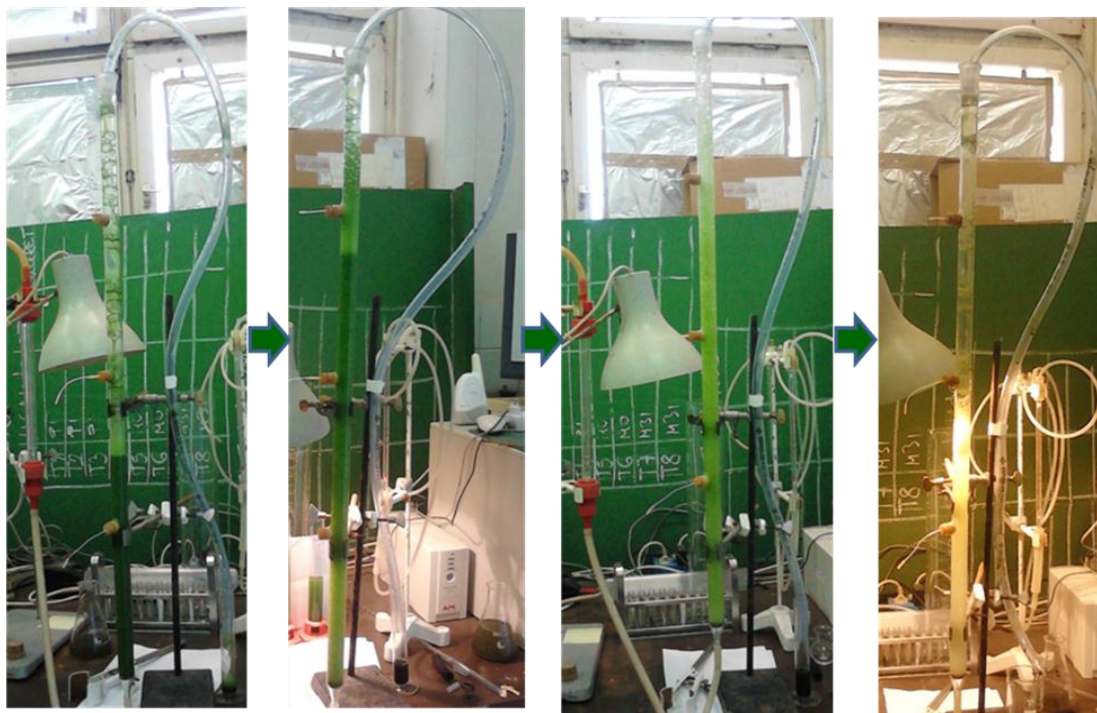
Az algaszuszpenzió tartalmazhat egyéb oldott szerves anyagokat, amelyek metabolitok vagy elpusztult algasejtek lehetnek. Ez a szervesanyag tartalom táptalaja lehet a heterotróf szervezeteknek, amelyek elszaporodása a leszüretelt szuszpenziók romlásához vezetnek.

Tapasztalataim szerint mikroszűréssel a szuszpenzió sűrítése mellett az eltarthatóság ideje is növelhető.

3.5. Habflotálási kísérletek

Habflotálási kísérleteimhez a szabadtéri termesztésből frissen szüretelt mintákat használtam fel. Vegyszerként salétromsav 1 mol HNO_3/dm^3 koncentrációjú oldatát alkalmaztam. A kezelt szuszpenziók térfogata 150 cm^3 , koncentrációjuk $4 \text{ g}/\text{dm}^3$, pH értékük pedig 9,8. A nagyobb hatásfokú flotálás érdekében 3,8-as pH -t állítottam be a HFx/1 kódú kísérleteimnél. A HFx/2 kóddal ellátott méréseim esetén a szuszpenziók koncentrációja $3,4 \text{ g}/\text{dm}^3$, pH értéke pedig 8,8 volt, a (salétromsavval) beállított pH értéke 4. A kísérletek során alkalmazott levegőáramot $10 \text{ dm}^3/\text{h}$ értékre állítottam be, 25-30 perces műveleti idő mellett.

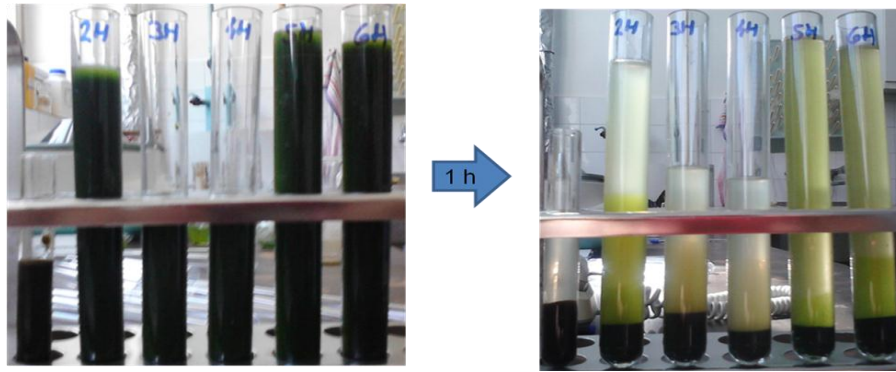
A szuszpenzió felhabzását, valamint az algában dúsuló habot, és a szegényedő maradvány szuszpenziót szemlélteti a **47. ábra**.



47. ábra Kísérleti habflotálás lépései

Érdekes volt megfigyelni, hogy a hab összeesése után, a koncentrált ($20\text{-}50 \text{ g alga}/\text{dm}^3$) szuszpenzióból viszonylag gyorsan (30-60 perc alatt) még sűrűbb zagy ülepedik ki, ahogy az a **48. ábrán** látható.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -



48. ábra Habként elvett sűrítmény időbeni változása

A hab vs. maradék koncentráció viszonyait a **20. táblázat** mutatja.

20. táblázat A habflotálási kísérletek eredményei

Mérés	Hab térfog. [cm ³]	Hab konc. [g/dm ³]	Maradék konc. [g/dm ³]	CF	VF
HF1/1	6,0	64	0,5	16	25
HF1/2	7,3	50	0,6	15	20
HF2/1	22	27,5	0,8	7	7
HF2/2	15	25	0,4	7,5	10
HF3/1	16	27,7	0,6	7	10
HF3/2	14	30	0,2	9	10
HF4/1**	8	20	0,42	10	18
HF4/2**	16	23	0,3	13	9
HF5/1***	32	22,5	0,1	6	5
HF5/2***	28	20	0,2	6	5
HF6/1****	39	16	0,15	4	4
HF6/2****	31	18	0,3	5	5

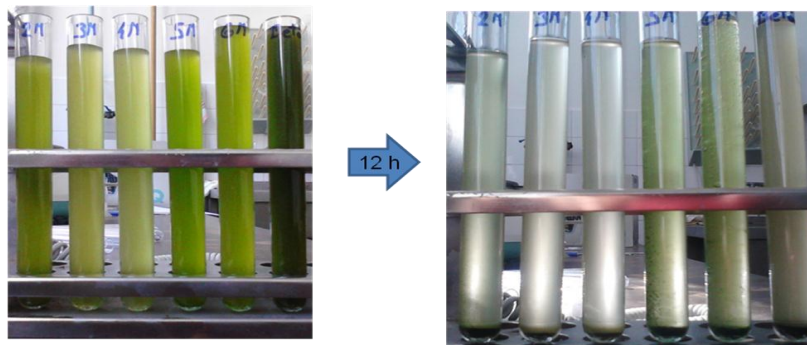
*a hab összeesése után, ** a kiindulási szuszpenzió kétszeres hígítással, *** eredeti szuszpenziók pH állítás nélkül, **** eredeti szuszpenziók pH állítás nélkül + benzil-trimetil-ammónium-klorid adagolással

A **48. ábrán** látható, kiülepedett sűrű zagy térfogata 5-6 cm³ a művelet paramétereitől (*pH*, *VF*, *t*) függetlenül. A kétszeresére hígított szuszpenziók esetén kb. 3 cm³ a zagy térfogata. Ezzel a zagyterfoggal számolva a művelet végső térfogat-sűrítése eredeti szuszpenziók (3,5-4,0 g/dm³) esetén: 150 cm³/(5-6 cm³) = 25-30, kétszeres hígítás (1,7-2,0 g/dm³) esetén pedig 150 cm³/(3 cm³) = 50.

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Ezekkel a VF értékekkel számolva a sűrű zagy alga-koncentrációja közelítőleg: az eredeti szuszpenziók esetén: $(3,5-4,0 \text{ g/dm}^3) \times 25-30 \sim 90-120 \text{ g/dm}^3$, a hígított szuszpenziók esetén: $(1,7-2,0 \text{ g/dm}^3) \times 50 \sim 85-100 \text{ g/dm}^3$. Így habflotálás és ülepítés alkalmazásával a sűrű zagy koncentrációja: $C_{zagy} = 80-100 \text{ g/dm}^3$.

További megfigyelésem, hogy a flotálás után a híg ($0,1-0,8 \text{ g/dm}^3$) szuszpenzióból is kiülepszik az alga (**49. ábra**), 20 cm^3 térfogatból $0,1-0,3 \text{ cm}^3$ válik ki. Erre az esetre a térfogatsűrítés értéke: $20 \text{ cm}^3 / (0,1-0,3 \text{ cm}^3) \sim 200-70 \text{ g/dm}^3$.



49. ábra Flotálás utáni, híg szuszpenziós maradék időbeni viselkedése

A zagykoncentrációk a hígabb szuszpenziókra: $\sim 0,1 \text{ g/dm}^3 \times 200 = 20 \text{ g/dm}^3$, a töményebb szuszpenziókra: $0,8 \text{ g/dm}^3 \times 70 = 56 \text{ g/dm}^3$.

Kis energiaigényű és gyors műveletként jellemezhető a habflotálás. De nem lehet elfelejteni az általában szükséges vegyszerek, valamint felületaktív anyagok alkalmazását, ami csakúgy, mint a vegyszeres flokkulációs műveletek, költségvonzattal jár és környezetterhelést is jelent. Felületaktív anyagok adagolása: $10-30 \text{ mg/dm}^3$ dózissal történtek meg kísérleteimnél. Az előkísérletek a habflotálásra, felületaktív anyagok adagolása nélkül is, rendkívül kedvező eredményeket adtak: a kihozatal $> 90 \%$, térfogatsűrítés: ($pH = 4$ értéken) $\sim 10-25$, térfogatsűrítés: (pH változtatás nélkül) ~ 5 . A habban átvitt zagy koncentrációja: $\sim 20-50 \text{ g/dm}^3$.


Az alga mind a sűrű zagyból, mind a híg (a flotálás után maradt) szuszpenzióból gyorsan kiülepedett. A (habflotálás + ülepítés) becsült jellemzői: a kihozatal $\sim 100 \%$, térfogatsűrítés a sűrű zagyra, $\sim 25-30 \%$ térfogatsűrítés a híg szuszpenzióra, $\sim 70-200 \%$ a habból kiülepedett sűrű zagy koncentrációra ($C_{zagy} \sim 80-100 \text{ g/dm}^3$), a híg szuszpenzióból kiülepedett zagy koncentrációja: $\sim 20-60 \text{ g/dm}^3$.

Ezek alapján úgy tűnik, hogy nem is kell habbal átvinni az algát egy másik térbe, elég, ha csak habosítjuk, majd ülepítjük.

3.6. Szeparációs műveletek energiamérlege

3.6.1. Flokkulálás energiamérlege

A flokkulálás energiamérlegének számításakor a vegyszer elosztása érdekében alkalmazott keverő (50. ábra) teljesítményét, valamint a kiülepedés következtében algasejt-mentessé vált oldat eltávolítására szolgáló szivattyú (21. táblázat) teljesítményét vettem figyelembe.



IKA RW 11 basic „Lab egg” pálcsás keverőmotor	
Kisméretű, divatos formatervezésű készülék alacsony viszkozitású (vízszerű) folyadékokhoz. A fordulatszám fokozatmentesen szabályozható. A keverőmotor állványra rögzíthető.	Műszaki adatok:
Tartozék: standard keverőszár lapos véggel (lásd tartozékok).	RW 11 basic
Kód: 56.2830004	Teljesítmény: 1 Watt
	Max. viszkozitás: 100 mPas
	Max. nyomaték: 0,8 Ncm
	Keverési térfogat: 2 liter
	Fordulatszám: 0 – 2.200 ford./perc
	Méretek: 86 × 175 × 89 mm
	Súly: 0,39 kg

50. ábra Vegyszer elosztására használt laboratóriumi keverőmotor műszaki adatai

21. táblázat Laboratóriumi kísérletben használt, műanyag járókerekes Aquasolar 700 típusú centrifugál szivattyú műszaki adatai

Aquasolar 700 adatai	
Feszültség [V DC]	12-24
Energiafogyasztás [W]	8
Max. áramlási sebesség [dm ³ /min]	12
Max. emelőmagasság [m]	2
Súly [kg]	1,7

A 22. táblázat 2 dm³ algaszuszpenzió flokkulálási paramétereit mutatja meg.

22. táblázat 2 dm³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paramétereit

	Készülék műveleti idő	Készülék teljesítmény	Felvett energia	Összesen felvett energia	
Keverés	10 min	1 W	0,17 Wh	0,19	Wh
Szivattyú	0,17 min	8 W	0,023 Wh		

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

Az ülepedés műveleti idejét elhagytam, mert az alkalmazott berendezések működési idejéhez képest elhanyagolható.

Ahhoz, hogy a vegyszeres sűrítési műveleteket 1 m^3 -re tudjam normálni, nagyobb teljesítményű keverőmotor és szivattyú alkalmazásával kell számolnom.

Mivel a keverési kísérletet kis mintával (modellkeverővel) végeztem de ipari (üzemi) méretre kívánok áttérni, a következők szerint vehetem figyelembe a méretnövelés hatását:

$$P' / V = \text{állandó} \quad (22)$$

A **22. egyenletet** átalakítva a kis mintával végzett kísérlet alapján a következő összefüggést kapjuk:

$$P_{ipari} = (P_{kisminta} / V_{kisminta}) * V_{ipari} \quad (23)$$

A **23. egyenletbe** behelyettesítve az adatokat az ipari méretű keverő teljesítményfelvételére a következő érték adódik:

$$P_{ipari} = (1 \text{ W} / 2 \text{ dm}^3) * 1000 \text{ dm}^3 = \underline{500 \text{ W}} \quad (24)$$

Szivattyúnak Tellarini önfelszívó vegszerszivattyú *ALT 20 L 400V* típusú speciális folyadékgyűrűs szivattyút választottam. Ez a szivattyú kiválóan alkalmazható vegyszerek, például műtrágyák szivattyúzására, így az általam szállítani kívánt szuszpenzió kezeléséhez alkalmas. Műszaki adatait a **23. táblázat** tartalmazza.

23. táblázat TELLARINI önfelszívó vegszerszivattyú főbb műszaki adatai

TELLARINI vegszerszivattyú adatai	
Emelőmagasság [m]	1-5
Folyadékcsatlakozás [dm ³ /min]	11-2
Max. szívómélység [m]	6
Feszültség	400 V – 50 Hz
Villanymotor [kW]	0,18

- Kísérleti munka és eredmények bemutatása -

A fentiek alapján az 1 m³-es szuszpenzió kezelésének paramétereit a **24. táblázat** mutatja meg.

24. táblázat 1 m³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paramétereit

	Készülék műveleti idő		Készülék teljesítmény		Felvett energia		Összesen felvett energia	
Keverés	10	min	500	W	83,33	Wh	288,53	Wh
Szivattyú	68,18	min	180	W	205,20	Wh		

Az értékeket összefoglalva és m³-re normálva a következő adatokat kapjuk:

$$\Sigma E_{felvett} = 288,53 \text{ Wh/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$\Sigma t_{művelet} = 78,18 \text{ min/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$CF_{flokkulálás} = 4$$

Figyelembe kell vennünk, hogy az így előállt sűrítmény az algasejteken és a hozzáadott flokkulálószer maradványain kívül tartalmaz anyagcseretermékeket, maradványsókat és más egyéb anyagokat is, amelyek a későbbi feldolgozásnál nehézségeket okozhatnak.

Az energiamérleg meghatározása mellett számolnunk kell azzal is, hogy a flokkulálószer ráfordítási igénye is jelentős lehet.

A továbbiakban, hogy összehasonlítható legyen a membránszűrés és a flokkulációs szűrés energia mérlege, a *CF* flokkulálás értékét 14-nek választom, és kiszámolom az ehhez a koncentrációs faktor eléréséhez szükséges műveleti időt és összes energiafelvételt.

*CF*_{flokkulálás} = 14 esetén:

25. táblázat 1 m³ szuszpenzió vegyszeres sűrítési paramétereit *CF*=14-nél

	Készülék műveleti idő		Készülék teljesítmény		Felvett energia		Összesen felvett energia	
Keverés	10	min	500	W	83,33	Wh	336,58	Wh
Szivattyú	84,42	min	180	W	253,25	Wh		

Az értékeket összefoglalva, 1 m³-re normálva a következő adatokat kapjuk:

$$\Sigma E_{felvett} = 336,58 \text{ Wh/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$\Sigma t_{művelet} = 94,42 \text{ min/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

3.6.2. A mikroszűrés energiamérlege

A membránnal történő szeparáció energiamérlegének számításakor a membrán tisztításáért és a sűrítmény homogén eloszlásáért felelős membránkompresszor teljesítményét, valamint a permeátumszivattyú teljesítményét vettem figyelembe. A **26. táblázat** 280 dm³ algaszuszpenzió sűrítési paramétereit mutatja be.

26. táblázat 280 dm³ algaszuszpenzió MF sűrítési paramétereit

	Készülék műveleti idő	Készülék teljesítmény	Felvett energia	Összesen felvett energia	
Membrán kompresszor	684 min	250 W	2850 Wh	3830,4	Wh
Szivattyú	684 min	86 W	980,4 Wh		

Az értékeket 1 m³-re normálva a következő adatokat kapjuk:

$$\Sigma E_{felvett} = 13680 \text{ Wh/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$\Sigma t_{művelet} = 2442,86 \text{ min/ m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$CF_{mikroszűrés} = 14$$

A membránkompresszor kiváltható lehet a technológiában használt komprimált gázzal, így a következő képpen alakulna a művelet energiaigénye:

27. táblázat 280 dm³ algaszuszpenzió MF sűrítési paramétereit, kompresszor helyett a technológiában rendelkezésre álló komprimált gáz bevezetésével

	Készülék műveleti idő	Készülék teljesítmény	Felvett energia	Összesen felvett energia	
Technológiai gáz	684 min	- W	- Wh	980,40	Wh
Szivattyú	684 min	86 W	980,40 Wh		

Az értékeket 1 m³-re normálva a következő adatokat kapjuk:

$$\Sigma E_{felvett} = 3501,43 \text{ Wh/m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$\Sigma t_{művelet} = 2442,86 \text{ min/ m}^3 \text{ algaszuszpenzió}$$

$$CF_{mikroszűrés} = 14$$

A fentiekből jól látszódik, hogy a mikroszűrés energiaigénye majdnem negyedére csökken, ha a technológiához kapcsoljuk. A fent leírt műveletből egy teljesen jól kezelhető, hosszabb ideig stabilis és tisztán mikroalgasejteket tartalmazó szuszpenzióhoz jutottam. A készülék paramétereinek átállításával és/vagy egy új állapotú membránmodul beépítésével a mikroszűrés művelet paramétereit valószínűleg tovább javíthatóak.

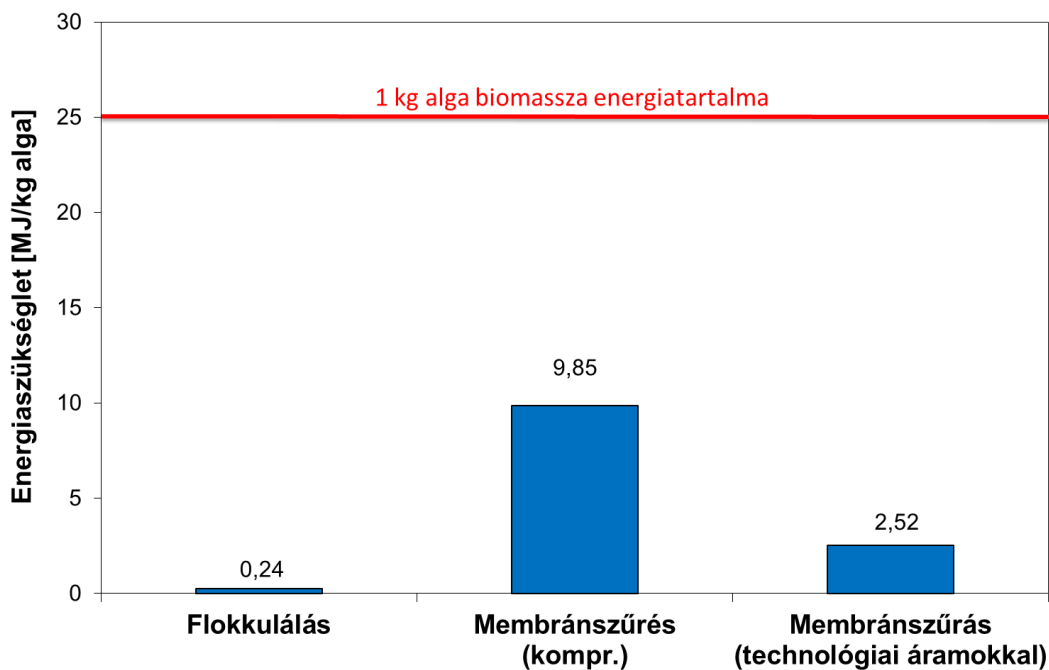
3.6.3. Flokkulálás és mikroszűrés összehasonlítása

A flokkulálási és mikroszűrés műveletek eredményeinek összehasonlítása a **28. táblázat**ban látható.

28. táblázat A 14-es koncentrációs faktor esetén számolt adatok összehasonlítása

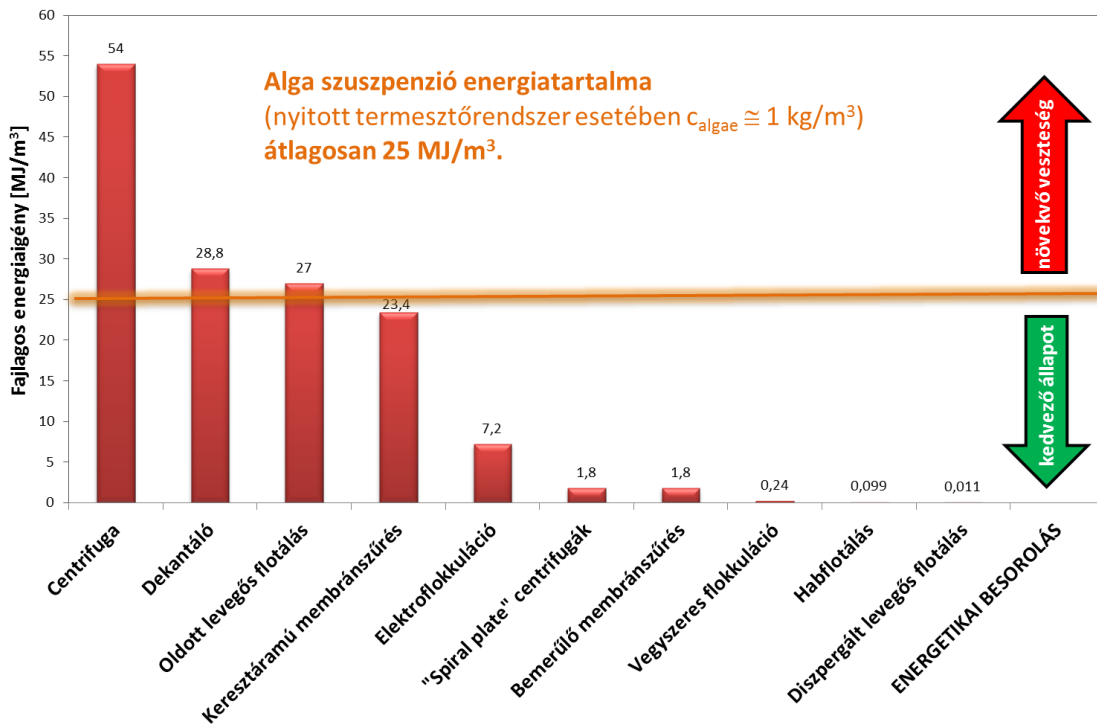
1 m ³ algaszuszpenzióra vonatkoztatva	Készülék műveleti idő	Készülék teljesítmény	Összesen felvett energia	
$CF_{CO_2\text{-fojtás}} = 14$	Szuszpenziót mozgató szivattyú	114 min	180 W	342 Wh
$CF_{flokulálás} = 14$	Keverés	10 min	500 W	336,58 Wh
	Szivattyú	85 min	180 W	
$CF_{mikroszűrés} = 14$	Membrán kompresszor	2443 min	250 W	13680 Wh
	Szivattyú	2443 min	86 W	
	Techno. gáz	2443 min	- W	3501,43 Wh
	Szivattyú	2443 min	86 W	

Energetikai becsléseimből jól látszik, hogy a felső határként definiált energiaszintet (25,5 MJ/kg alga) egyik szeparációs kísérletem sem lépte át (**51. ábra**).



51. ábra Szeparációs kísérletek energetikai értékelő diagramja

Az **52. ábrán** jelenítem meg az irodalmi áttekintés során összegyűjtött szeparációs műveleteket, azok becsült energiaigényét.



52. ábra Irodalmi áttekintés során összegyűjtött szeparációs módszerek energijellemzői

Az ábra szerint a keresztáramú membránszűrés, az elektroflokkuláció, a „spiral plate” centrifuga, a bemerülő membránszűrő, a vegyszeres flokkuláció, a habflotálás és a diszpergált levegős flotálás műveletei esnek a kedvező állapotú (energiaigényük kisebb, mint a szeparált biomasszából elméletileg kinyerhető energiamennyiség) energetikai besorolás alá a szóbajöhető lehetőségek közül. Energiabecslésem során, én is hasonló értékeket kaptam.

Az elektroflokkuláció és vegyszeres flokkuláció energiamérlegében nem jelennek meg az egyéb költségek, ami a vegyszerek beszerzését és az utókezelések költségét foglalja magában. A flotáláshoz szükséges adalékanyagok költségének figyelembevétele szintén nagymértékben bonyolítaná az energiatatuszok megállapítását. Az alkalmazott vegyszermennyiségek a kezelendő szuszpenzió minőségétől függően olyan tág intervallumok közt mozognak, hogy egyszerűbb faktorokkal nem vehetőek figyelembe.

Az energetikai értékelésünk során érdemes szem előtt tartanunk azt is, hogy milyen koncentrációjú algaszuszpenzió kezelését szeretnénk elvégezni a választott művelettel. A méretnövelés és a kezelendő szuszpenzió koncentrációjának drasztikus csökkenése szükségessé teheti, hogy újból és újból sorra vegyük az egyes szeparációs lehetőségeket, azok energetikai státuszának változását. Például a flotálás esetében egy egyszerű gondolat kísérlettel belátható, hogy amennyiben jóval hígabb szuszpenziót szeretnénk kezelni, nagymértékben (akár nagyságrendekkel) változhat a készülék energetikai besorolása. A flotáló készülék mérete miatt a gázáram-mennyiséget nem csökkenthetjük, ugyanakkor a hígabb szuszpenzió nehezebben képez habot, és az nem is akkora térfogatú és stabilitású, hogy megegyező lenne egy sűrűbb szuszpenzió habjával. Így csak kisebb mennyiségben tud feldúsulni az alga a habban, ha csak nem használunk több vegyszert, ill. felületaktív anyagot, ami további kérdéseket vet fel. Míg pl. a membránszeparációra gyakorlatilag nincs hatással a kezelendő szuszpenzió sem az állapota, sem pedig a koncentrációja, azt a megadott paraméterekkel képes sűríteni.

A fent leírtak mellett fontos kérdés a termesztő technológia időbeni üzemeltetése (szakaszos, félfolyamatos, folyamatos) azaz, hogy milyen termesztő rendszerhez szükséges kapcsolnunk a szeparációs műveletet. Az üzemi méretű biomasszatermelés esetében a félfolyamatos, folyamatos üzemű (vagy ahhoz konvergáló) termesztő technológia az előnyös, a biomassa kapacitás maximalizálásának érdekében (szaporodási görbe leg meredekebb szakaszában üzemeltetve a reaktort maximalizálható annak kapacitása). Ez utóbbi szempont szerint is a bemerülő membránszeparációs művelet részesül előnyben.

Összefoglalás

A kutatás célja magyarországi éghajlati viszonyok között működő, energetikai célú algatechnológia és az ahhoz kapcsolódó szeparációs módszer(ek) kidolgozása.

Dolgozatom irodalmi részében tárgyaltam az algatechnológia előnyeit és hátrányait. Ismertettem a technológia teljes vertikumát, a szeparációs műveletek köré építve azt. Sorra vettem és bemutattam a felhasználható, jelenleg ismert szeparációs technikákat. Dolgozatom kísérleti részében elsősorban a szóbajöhető szeparációs módszereket ismertettem.

Az adott éghajlati viszonyok között megbízhatóan üzemeltethető természetű rendszert terveztem meg és üzemeltettem az elmúlt években, ami megfelelő mennyiségű és minőségű alapanyagot biztosított a szeparációs kutatásaim elvégzéséhez.

Az újonnan megfigyelt jelenség [amit CO₂ fojtás-nak neveztem el (Flow Choke with Carbon Dioxide - *FCCD*)] vizsgálatait elvégeztem. A vizsgálatokhoz egy alkalmas készüléket (*FCCD* készülék) terveztem és építettem meg, aminek segítségével a jelenség működési paramétereit optimalizáltam a gyakorlatban való hasznosíthatósághoz.

FCCD kísérleteim során új mérési metódust dolgoztam ki, amit relatív részecske-töltöttség megoszlás (*RRTM*) mérésnek neveztem el. A módszer részecske-töltöttség detektálásán alapul, és új lehetőséget nyújt a mikroalga szuszpenziók ülepedésének számszerűsítésére, ilyen módon segítve a szeparációs paraméterek hatásának megállapítását. Az általam *RRTM* módszernek nevezett eljárás technikai szempontból újszerű, csakúgy mint az *FCCD*. A technológia alkalmazhatósága felveti a jövőbeli szabadalmaztatás lehetőségét is.

Vegyszeres flokkulálási kísérleteim révén az optimálisan alkalmazható flokkulálószer keverék komponenseit definiáltam, a keverék vegyzerszükségletét minimalizáltam.

Membránszeparációs kísérleteim eddigi eredményeit kiértékelve megállapítható, hogy a permeátum fluxus értékei alapján a különböző koncentrációjú, összetételű szuszpenziók azonos teljesítménnyel szűrhetők a vizsgált tartományokban.

- Összefoglalás -

Baerdemaeker és munkatársai (2013) az általam vizsgált algafajhoz hasonló morfológiájú algaszuszpenziójukat $20 \text{ l/m}^2\text{h}$ fluxussal tudták szűrni, míg az általam mért adatok többségében magasabbak az értékek: átlagosan $25 \text{ l/m}^2\text{h}$. A sűrítmény desztillált vizes atmoszárával csillapítani tudtam a szűrletfluxus ingadozását, az által, hogy az anyagcsere-termékeket és maradványsókat átmostam a permeátumba, és így nem fejtették ki a membránra szinergizáló hatásukat.

Membránszeparációs kísérleteim során elvégeztem a permeátum termesztésbe történő visszaforgathatóságának vizsgálatát is. Castrillo és munkatársai (2013) egyszeri visszaforgatást vizsgáltak, így eredményesnek mondhatom permeátum alapon történő szaporítási kísérleimet, mivel azok bizonyították a permeátum kétszeri visszaforgathatóságát, 90 %-os felszaporítási hatások felett. Amennyiben célunk a tápközeg rendszerbe való visszaforgatása (maradványsók hasznosítása) legnagyobb létjogosultsága ennek a szeparációs műveletnek van.

A habflotálási művelet működési paramétereit definiáltam. Továbbá érdekes és használható jelenséget figyeltem meg, miszerint a hab fázist nem feltétlenül kell átvinni másik térrészbe, mert a beporlasztott gáz hatására az adott geometriában intenzív kiülepedés indul meg.

Kísérleteimnél a vegyszerminimalizálás és az energiaminimalizálás volt a fő cél, mint költség, mint pedig környezetterhelési szempontok miatt. A szeparációra gyors és gazdaságos módszereket dolgoztam ki.

Tézisek

1. Az ipari füstgázok és szennyvizek kezelésére megterveztem és kiépítettem az algatechnológiai műveletláncot. A kiépített rendszerben az algák termesztését laboratóriumi „flat panel” foto-bioreaktorokban végeztem. A reaktor a - szakirodalmak alapján - becsült elnyeletési és kihozatali értékeket elérte (elméleti termelékenység 5,6 kg alga/m²/év, mért termelékenység ~ 4 kg alga/m²/év, CO₂ felvevő képesség 4,9 kg/m²/év, előállítható biodízel mennyiség 1010 m³/év), így megfelelő mennyiségű biomasszát tudtam előállítani a szeparációs kísérletekhez.

2. Autoflokkulációs kísérleteim során egy új jelenséget tapasztaltam, amelyet CO₂-fojtásnak neveztem el (Flow Choke with Carbon Dioxide, *FCCD*). A módszer lehetőséget ad egy kis energiaigényű ülepítési technológia kialakítására. A vizsgálatokhoz megterveztem és megépítettem egy speciális ülepítő, *FCCD* készüléket. A készülék alkalmas a CO₂-fojtásra ható paraméterek és azok összefüggéseinek vizsgálatára, kétféle üzemben (nyomás alatt, gáz átáramoltatással)

Meghatároztam a módszer műveleti paramétereit. Megállapítottam, hogy a nyomás alatti *FCCD* optimális paramétereit 20-30 °C és 1,5-3 bar, 180 perces műveleti idővel. Az átáramoltatásos *FCCD* optimális paramétereinek a 75-100 % CO₂-tartalmú gáz/gázkeverék alkalmazása esetén a 20-35 °C hőmérséklet és 12-24 órás műveleti idő bizonyult. Megállapítottam továbbá, hogy különböző minőségű szuszpenziók azonos teljesítménnyel szeparálhatóak a vizsgált tartományokban.

3. A CO₂-fojtás hatásfokának megállapításához egy új mérőszámot definiáltam, amely a szeparáció során kialakult alsó és felső fázis fajlagos töltés-sűrűségeinek hányadosa. A mérőszámot relatív részecske-töltöttség megoszlásnak (*RRTM*) neveztem el. A módszer új lehetőséget nyújt a mikroalga szuszpenziók ülepedésének számszerű jellemzésére.

A kísérleti tapasztalatok alapján megállapítottam, hogy 2,5 relatív részecske-töltöttség megoszlás (*RRTM*) felett érhető el szeparáció.

4. Flokkulációs kísérletek alapján definiáltam az adott technológiához optimálisan alkalmazható flokkulálószer összetételét (NaOH + *Poly-DADMAC* + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) és minimalizáltam a vegyszerigényét (10-11-es *pH*-ig NaOH plusz 39-65 ml *Poly-DADMAC* plusz 1,2-2,4 ml $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ / 1 dm³ algaeegy).

5. Mikroszűrési kísérletek eredményei alapján megállapítottam, hogy a különböző koncentrációjú és összetételű szuszpenziók azonos teljesítménnyel szűrhetők a vizsgált tartományokban (átlagos permeátumfluxus 25 dm³/m²h). A végső algasűrítmény 30,4 g/dm³ koncentrációval rendelkezik mikroalgára nézve, 20 dm³-es térfogatban. A szárazanyag-tartalmat 0,6 %-ról 3 %-ra emelnem a művelet során.

Megállapítottam, hogy a sűrítmény desztillált vizes atmoszárával csillapítható a szűrletfluxus ingadozás. A mosás hatására az anyagcsere-termékek és maradványsók a permeátumba kerülnek, így megszűnik a membránra nézve szinergizáló hatásuk.

Vizsgáltam a permeátum természetbe történő visszaforgathatóságának lehetőségét. Megállapítottam, hogy kétszeri visszaforgatás esetén 90 % feletti felszaporítási hatások érhetőek el.

6. Az alगतömeg szeparálásának lehetőségét habflotálással is elvégeztem. Megállapítottam, hogy speciális készülék-konstrukciót alkalmazva a szeparáció gazdaságosan megoldható. A habfázist nem kell másik térrészbe átvinni, mert a beporlasztott gáz hatására az adott rendszerben intenzív kiülepedés indul meg. Az alga mind a sűrű zagyból, mind a híg (a flotálás után maradt) szuszpenzióból gyorsan kiülepedik. A (habflotálás + üleptetés) becsült jellemzői: a kihozatal ~ 100 %, térfogatsűrítés a sűrű zagyra, ~ 25-30 % térfogatsűrítés a híg szuszpenzióra, ~ 70-200 % a habból kiülepedett sűrű zagy koncentrációra ($C_{\text{zagy}} \sim 80-100$ g/dm³), a híg szuszpenzióból kiülepedett zagy koncentrációja ~ 20-60 g/dm³.

Theses

1. A chain of operations was designed and implemented for the treatment of industrial flue gases and wastewaters. The cultivation of the algae in the system was carried out in laboratory-scale “flat panel” photo-bioreactors. According to the available literature, the reactor reached its estimated absorption and turnout values (theoretical yield 5.6 kg algae/m²/year, measured yield ~4 kg/algae/m²/year; CO₂ uptake 4.9 kg/m²/year; annual biodiesel production 1010 m³/year) thus producing an adequate amount of biomass for the separation experiments.

2. A new phenomenon was observed during the autoflocculation experiments, which was named CO₂ choking (Flow Choke with Carbon Dioxide – *FCCD*). The method gives the opportunity of implementing a settling technology with a low-energy demand. A special *FCCD* settling basin which is capable of analyzing the parameters and correspondences that affect CO₂ choking in two different modes (under pressure, and with gas throughput) was designed and built for the studies.

The operational parameters of the method have been determined. The optimal parameters under pressure for *FCCD* proved to be 20-30 °C, 1.5-3.0 bar and 180 minutes of operation when using a gas (or gas mixture) of 75-100 % CO₂. As for flow-through *FCCD*, the optimal parameters proved to be temperatures between 20 and 35 °C, and 12-24 hours of operation. It was also concluded that suspensions of different quality can be separated with the same efficiency in the examined range.

3. A new unit was defined for the determination of the efficiency of CO₂ choking, which is the quotient of the relative charge densities of the upper and lower phases formed during the separation. The unit was named relative particle charge density partition coefficient (*RRTM*). The method provides a new possibility for the numeral characterization of the settling of the microalgae suspensions.

Based on the experimental data, it was determined that complete separation can be reached above a relative particle charge density partition coefficient of 2.5.

4. Based on experiments with flocculation, the optimal flocculant was defined (NaOH + *Poly-DADMAC* + Fe₂(SO₄)₃) and the requirement of chemicals was minimized (up to *pH* 10-11 NaOH plus 39-65 ml *Poly-DADMAC* plus 1.2-2.4 ml Fe₂(SO₄)₃ / 1 dm³ algae mixture).

5. Based on the results of the microfiltration experiments it has been concluded that suspensions of different concentration and composition can be filtered in the examined ranges (average permeate flux 25 dm³/m²h). The final algae concentrate has a microalgae concentration of 30.4 g/dm³ in a volume of 20 dm³. The dry matter content was increased from 0.6 % to 3 % during the operation.

It has been observed that the variation of the filtrate flux can be decreased by washing the concentrate with distilled water. Because of the washing, the metabolites and residual salts are transferred into the permeate and their synergetic effect exerted on the membrane ceases.

The possibility of the reintroduction of the permeate into the cultivation process was examined. It has been determined that a propagation yield of over 90 % can be reached by double recirculation.

6. The separation of the algae mass was also carried out by foam fractionation. It was concluded that the separation can be carried out economically by using a specially constructed device. The foam phase need not be transferred into another vessel as intensive settling commences because of the inlet gas. The algae settle quickly from both the dense residue and the dilute suspension. The approximate characteristics of foam fractionation + sedimentation are: yield ~100 %; volume concentration relative to the concentrated residue ~25-30 %; volume concentration relative to the dilute suspension ~70-200 %; concentration of the concentrated residue that settled from the foam (C_{residue} ~ 80-100 g/dm³); concentration of the residue that settled from the dilute suspension: ~ 20-60 g/dm³.

Publikációk

Cikkek:

1. Zoltán Hodai, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: New bio-flocculatioous effect and its examination, *World Journal of Engineering and Technology* 2/2014, 2014, 116-123.
2. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Use of algae mass densified through various methods for biogas production, 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE Xplore)*, 2013, 1-5.
3. Hodai Zoltán, Rippelné Dr. Pethő Dóra, Dr. Horváth Géza, Dr. Hanák László, Bocsi Róbert: Algatechnológia és sűrítési műveletek/Algae technology and densification methods/Tehnologia algelor si metode de densificare, *Műszaki Szemle TECHNICAL REVIEW* 62/2013, ISSN 1454-0746, 2013., 39-44.
4. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Separation methods in the algae technology, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 2012., 5-8.
5. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Energetikai céllal tenyésztett mikroalga-szuszpenziók sűrítése, *Membrántechnika és ipari biotechnológia*, 2011., 62-70.
6. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Densification processes of microalgae bred for biodiesel production, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 2011., pp. 67-71.
7. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Problems occurring during the processing of microalgae propagated for oil production, *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Chemia*, 2010., pp. 63-73.
8. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Extraction examinations of microalgae propagated for biodiesel additives, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 2011., pp. 45-49.
9. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Algae cultivation for energetic purposes, research on algae technology at the University of Pannonia, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 2012., 15-18.
10. Róbert Bocsi, Géza Horváth, László Hanák, Zoltán Hodai: Processing residuals from microalga technology, 2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE), *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE Xplore)*, 2013, 1-5.

Konferenciakiadványok:

11. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák: Problems occurring during the processing of microalgae propagated for oil production/ Olajtermelésre szaporított mikroalgák feldolgozásának problémái, 16th International Conference of Chemistry, Kolozsvár, Románia, 2010.
12. Hodai Z., Horváth G., Hanák L., Bocsi R.: Olajtermelésre szaporított mikroalgák szeparációja a tenyészközegtől, Műszaki Kémiai Napok'11, Veszprém, 2011.
13. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák: Membrane filtration in algae technology/ Membránszűrés az algatechnológiában, 17th International Conference of Chemistry, Kolozsvár, Románia, 2011.
14. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák, R. Bocsi: Lipid content enhancement during the processing of micro algae bred for biodiesel production and CO₂ absorption, Interfaces '11 Conference, Science and innovation for sustainable progress in petroleum refining and petrochemistry, Sopron, 2011.
15. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Energetikai céllal termesztett mikroalgák feldolgozása, XVII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2012.
16. Zoltan Hodai, Geza Horvath, Robert Bocsi: The separation of microalgae produced for oil production from substrate solution, PSC – IMFS 10, 2012.
17. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Densification options of microalgae suspension propagated for lipid production, 9th European Workshop Biotechnology of Microalgae, Nuthental, Németország, 2012.
18. Hodai Z., Horváth G., Hanák L., Bocsi R.: Lipidtermelésre szaporított mikroalga szuszpenziók sűrítési lehetőségei, Műszaki Kémiai Napok'12, Veszprém, 2012.
19. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák, R. Bocsi: Densification techniques of algaebiomass: energetical evaluation/ Algabiomassza besűrítési műveletek: energetikai értékelés, 18th International Conference of Chemistry, Félixfürdő, Románia, 2012.
20. Bocsi R., Horváth G., Hanák L., Hodai Z.: Lipidtermelésre termesztett mikroalgák szaporításának vizsgálata természetes fényben, Műszaki Kémiai Napok'11, Veszprém, 2011.
21. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Extraction of microalgae propagated for biodiesel additives/ Biodízel keverőkomponensek előállítására termesztett mikroalgák extrakciója, 17th International Conference of Chemistry, Kolozsvár, Románia, 2011.

- Publikációk -

22. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Photometric method for monitoring lipid productive microalgae propagated in natural light, Interfaces '11 Conference, Science and innovation for sustainable progress in petroleum refining and petrochemistry, Sopron, 2011.
23. Bocsi Róbert, Horváth Géza, Hanák László, Hodai Zoltán: Mikroalgák energetikai célú termesztése, XVII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2012.
24. Robert Bocsi, Geza Horvath, Zoltan Hodai: Processing microalgae suspension propagated in flat panel photobioreactors, PSC – IMFS 10, 2012.
25. Róbert Bocsi, Géza Horváth, László Hanák, Zoltán Hodai: Microalgae cultivation in Veszprém: design and construction of flat panel photobioreactors, 9th European Workshop Biotechnology of Microalgae, Nuthental, Németország, 2012
26. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Bioüzemanyagok előállítására termesztett mikroalgák lipidextrakciója/ Lipidextraction of microalgae propagated for biofuel components, 18th International Conference of Chemistry, Félixfürdő, Románia, 2012.
27. Bocsi Róbert, Horváth Géza, Hanák László, Hodai Zoltán: Fotobioreaktorokban termesztett mikroalgák feldolgozása, XVIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2013.
28. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algatechnológiai besűrítési műveletek, XVIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2013.
29. Zoltan Hodai, Geza Horvath, Laszlo Hanak, Robert Bocsi: Use of algae mass densified through various methods for biogas production, 4th International Youth Conference on Energy, 6-8. June, 2013, Siófok, Hungary
30. Robert Bocsi, Geza Horvath, Laszlo Hanak, Zoltan Hodai: Processing residuals from microalga technology, 4th International Youth Conference on Energy, 6-8. June, 2013, Siófok, Hungary
31. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Különböző forrásból származó algaszuszpenziók kezelése/Processing of algae suspensions from different sources, Műszaki Kémiai Napok 2013, 2013. Április 23.-25., Veszprém
32. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Szabadtéri fotobioreaktorban termesztett mikroalga-szuszpenziók jellemzése/Characterization of microalgae suspension which cultivated in open-air photobioreactor, Műszaki Kémiai Napok 2013, 2013. Április 23.-25., Veszprém

- Publikációk -

33. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák, R. Bocsi: Comparison of microalgae-separation procedures/Mikroalga-szeparációs műveletek összehasonlítása, 19th International Conference of Chemistry, Nagybánya, Románia, 2013. november 21-24.
34. R. Bocsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Production of biofuel components from microalgae/Üzemenyagok biokomponenseinek előállítása mikroalgákból, 19th International Conference of Chemistry, Nagybánya, Románia, 2013. november 21-24.
35. Zoltán Hodai, Dr. Dóra Rippel-pethő, Dr. Géza Horváth, Dr. László Hanák, Róbert Bocsi: Microalgae densification experiments in Veszprém, International Alga Congress 2013, Hamburg, Németország, 2013. december 3-4.
36. Róbert Bocsi, Dr. Dóra Rippel-pethő, Dr. Géza Horváth, Dr. László Hanák, Zoltán Hodai: Microalgae cultivation in Veszprém: design and construction of flat panel photobioreactors, International Alga Congress 2013, Hamburg, Németország, 2013. december 3-4.
37. Zoltán Hodai, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Membrane filtration in microalgae technology, X Meeting of Young Chemical Engineers 2014., Horvátország, Zágráb, 2014. február 19-22.
38. Róbert Bocsi, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Zoltán Hodai: Microalgae cultivation in flat panel photobioreactors in Veszprém, X Meeting of Young Chemical Engineers 2014., Horvátország, Zágráb, 2014. február 19-22.
39. Bocsi Róbert, Horváth Géza, Hanák László, Hodai Zoltán: Microalgae cultivation in outdoor flat panel photobioreactor, XIX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2014.
40. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algae technology's energetical assay, XIX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2014.
41. Zoltán Hodai, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Separation processes of microalgae bred for biodiesel production, 4th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, USA, New Mexico, Santa Fe, 2014.
42. Róbert Bocsi, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Zoltán Hodai: Microalgae cultivation in outdoor flat panel photobioreactors, 4th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, USA, New Mexico, Santa Fe, 2014.

Poszterek:

43. Z. Hodai, G. Horváth, L. Hanák, R. Bócsi: Densification options of microalgae suspension propagated for lipid production, 9th European Workshop Biotechnology of Microalgae, Nuthental, Németország, 2012.
44. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bócsi Róbert: Flokkulációs vizsgálatok a lipidtermelő algatechnológiában, Mobilitás és környezet: Járműipar, energetika és környezetvédelem, Veszprém, 2012.
45. Z. Hodai, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, L. Hanák, R. Bócsi: Microalgae densification experiments in Veszprém, International Alga Congress 2013, Hamburg, Németország, 2013.
46. Z. Hodai, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, L. Hanák, R. Bócsi: Membrane filtration in microalgae technology, X Meeting of Young Chemical Engineers 2014., Horvátország, Zágráb, 2014.
47. Zoltán Hodai, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bócsi: Separation processes of microalgae bred for biodiesel production, 4th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, USA, New Mexico, Santa Fe, 2014.
48. R. Bócsi, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Microalgae cultivation in Veszprém: design and construction of flat panel photobioreactors, 9th European Workshop Biotechnology of Microalgae, Nuthental, Németország, 2012.
49. Bócsi Róbert, Horváth Géza, Hanák László, Hodai Zoltán: Szabadtéri fotobioreaktorokban termesztett mikroalgákból származó extraktumok vizsgálata, Mobilitás és környezet: Járműipar, energetika és környezetvédelem, Veszprém, 2012.
50. I. Bánhidi, R. Bócsi, Z. Hodai, L. Hanák, G. Horváth: Biodízel keverőkomponensek előállításához tenyésztett mikroalgák lipidtartalmának elemzése, Mobility and environment: Challenges of the automotive industry in the fields of energetics, structural materials and environmental research, Veszprém, 2012.
51. R. Bócsi, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Microalgae cultivation in Veszprém: design and construction of flat panel photobioreactors, International Alga Congress 2013, Hamburg, Németország, 2013.

- Publikációk -

52. R. Bocsi, D. Rippel-Pethő, G. Horváth, L. Hanák, Z. Hodai: Microalgae cultivation in flat panel photobioreactors in Veszprém, X Meeting of Young Chemical Engineers 2014., Horvátország, Zágráb, 2014.
53. Róbert Bocsi, Dóra Rippel-Pethő, Géza Horváth, László Hanák, Zoltán Hodai: Microalgae cultivation in outdoor flat panel photobioreactors, 4th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, USA, New Mexico, Santa Fe, 2014.

Előadások és beszámolók:

54. Hodai Zoltán: Foto-bioreaktorokban termesztett mikroalga-szuszpenziók besűrítése, PhD értekezés munkahelyi vitája, Műszaki Kémiai Napok 2014 – VEAB Ipari Biotechnológiai ülés, Veszprém, 2014. május 14.
55. Hodai Zoltán: Foto-bioreaktorokban termesztett mikroalga-szuszpenziók besűrítése, Végbeszámoló, 2014.
56. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algae technology's energetical assay, XIX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2014.
57. Hodai Zoltán: Mikroalgatechnológiai kutatások, PhD hallgató szemináriumi előadása a Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszék (vegyésszámoló Msc) szakirányos hallgatói részére, Veszprém, 2014.
58. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algatechnológiai besűrítési műveletek, XVIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia, 2013.
59. Zoltan Hodai, Geza Horvath, Laszlo Hanak, Robert Bocsi: Use of algae mass densified through various methods for biogas production, 4th International Youth Conference on Energy, 6-8. June, 2013, Siófok, Hungary
60. Hodai Zoltán, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Különböző forrásból származó algaszuszpenziók kezelése, Műszaki Kémiai Napok 2013., Veszprém, 2013.

- Publikációk -

61. Hodai Zoltán, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Fotobioreaktorokban termesztett mikroalgaszuszpenziók besűrítése, Vegyipari Műveleti Munkabizottsági ülés, Veszprém, 2013.
62. Hodai Zoltán, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Mikroalga-szeparációs műveletek összehasonlítása, XIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Félixfürdő, Románia, 2013.
63. Hodai Zoltán, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Biodízel-keverőkomponens kinyerésre tenyésztett mikroalgák szeparációs műveletei, PhD hallgatók anyagtudományi napja XIII., Veszprém, 2013.
64. Hodai Zoltán, Rippelné Pethő Dóra, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algaszeparációs módszerek összehasonlítása, Vegyipari Műveleti Munkabizottsági ülés, 2013. Április 25., Veszprém
65. Hodai Zoltán: Energetikai célú algatechnológiai kutatások, PhD hallgató szeminárium előadása a Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszék (vegyésszmérnök Msc) szakirányos hallgatói részére, Veszprém, 2013.
66. Hodai Zoltán: Fotobioreaktorokban termesztett mikroalgaszuszpenziók besűrítése, PhD beszámoló V., 2013.
67. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Energetikai céllal termesztett mikroalgák feldolgozása, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka 2012, Kolozsvár, Románia, 2012.
68. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Lipidtermelésre szaporított mikroalga szuszpenziók sűrítési lehetőségei, Műszaki Kémiai Napok 2012., Veszprém, 2012.
69. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Szeparációs lehetőségek az algatechnológiában, Mobilitás és környezet: Járműipar, energetika és környezetvédelem, Veszprém, 2012.
70. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algaszuszpenziók besűrítési műveleteinek vizsgálata, PhD hallgatók anyagtudományi napja XII., Veszprém, 2012.
71. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Algabiomassza besűrítési műveletek: energetikai értékelés, XVIII. Nemzetközi Vegyészkonferencia, Félixfürdő, Románia, 2012.

- Publikációk -

72. Hodai Zoltán, Algaszeparációs módszerek összehasonlítása, Budapest, MTA, Munkabizottsági ülés, 2012. December 04.
73. Hodai Zoltán: Olajtermelésre szaporított mikroalgák szeparációs és sűrítési vizsgálatai, PhD beszámoló II., 2012.
74. Hodai Zoltán: Fotobioreaktorokban termesztett mikroalgaszuszpenziók besűrítése, PhD beszámoló III., 2012.
75. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Olajtermelésre szaporított mikroalgák szeparációja a tenyészközegtől, Műszaki Kémiai Napok'11, Veszprém, 2011.
76. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Biodízel előállítására tenyésztett mikroalgák szuszpenziójának sűrítési műveletei, Mobilitás és környezet, Veszprém, 2011.
77. Zoltán Hodai, Géza Horváth, László Hanák, Róbert Bocsi: Lipid content enhancement during the processing of micro algae bred for biodiesel production and CO₂ absorption, Interfaces '11 Conference, Science and innovation for sustainable progress in petroleum refining and petrochemistry, Sopron, 2011.
78. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Lipidkinyerésre tenyésztett mikroalgák szeparációs nehézségei, Bioenergetika Kerekasztal 2011, Veszprém, 2011.
79. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Membránszűrés az algatechnológiában, XVII. Nemzetközi Vegyész Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2011.
80. Hodai Zoltán, Horváth Géza, Hanák László, Bocsi Róbert: Sűrítési műveletek az energetikai célú algatechnológiában, PhD hallgatók anyagtudományi napja XI., Veszprém, 2011.
81. Hodai Zoltán: Olajtermelésre szaporított mikroalgák szeparációs és sűrítési vizsgálatai, PhD beszámoló I., 2011.
82. Hodai Zoltán: Szén-dioxid befogás technológiai áramokból algák felhasználásával Kísérleti munka bemutatása és értékelése, MOL Beszámoló a Pannon Egyetem Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszékén végzett algatechnológiai kutatásról, MOL Dunai Finomító, Százhalombatta, 2011.

- Publikációk -

83. Hodai Zoltán, Horváth Géza: Olajtermelésre szaporított mikroalgák feldolgozásának problémái, PhD Hallgatók Anyagtudományi Napja X., Veszprém, 2010.
84. Hodai Zoltán, Horváth Géza: The Problems Occuring During Processing Micro Algae Reproduced for Oil Production/ Olajtermelésre szaporított mikroalgák feldolgozásának problémái, 16th International Conference of Chemistry, Kolozsvár, Románia, 2010. november 12.
85. Hodai Zoltán, Horváth Géza: A finomítói CO₂ kibocsátás csökkentése és biodízel előállítása mikroalgákkal, PhD Hallgatók Anyagtudományi Napja IX., Veszprém, 2009.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni Rippelné Dr. Pethő Dóra adjunktusasszonynak és Dr. Horváth Géza egyetemi docens úrnak, témavezetőimnek a dolgozat elkészítése során nyújtott segítségükért, szakmai támogatásukért, amellyel hozzájárultak munkám sikeres elvégzéséhez.

Külön köszönetet mondok Dr. Hanák László docens úrnak hasznos szakmai tanácsaiért, munkám során nyújtott segítségéért.

Továbbá köszönet a Vegyipari Műveleti Intézeti Tanszék dolgozóinak, köztük Bocsi Róbertnek, akivel a kísérleteinkben kölcsönösen tudtuk segíteni egymás munkáját.

Veszprém

Hodai Zoltán

Irodalomjegyzék

- [1] David Dah-Wei Tsai, Rameshprabu Ramaraj, Paris Honglay Chen, Growth condition study of algae function in ecosystem for CO₂ bio-fixation, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume 107, 6 February **2012**, 27-34, ISSN 1011-1344
- [2] G. Venkata Subhash, Rashmi Chandra, S. Venkata Mohan, Microalgae mediated bio-electrocatalytic fuel cell facilitates bioelectricity generation through oxygenic photomixotrophic mechanism, *Bioresource Technology*, Volume 136, May **2013**, 644-653, ISSN 0960-8524
- [3] Raphael Slade, Ausilio Bauen, Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects, *Biomass and Bioenergy*, Available online 24 January **2013**, ISSN 0961-9534
- [4] Melissa Rickman, John Pellegrino, Jason Hock, Stephanie Shaw, Brice Freeman, Life-cycle and techno-economic analysis of utility-connected algae systems, *Algal Research*, Volume 2, Issue 1, January **2013**, 59-65, ISSN 2211-9264
- [5] A. Ruiz-Martinez, N. Martin Garcia, I. Romero, A. Seco, J. Ferrer, Microalgae cultivation in wastewater: Nutrient removal from anaerobic membrane bioreactor effluent, *Bioresource Technology*, Volume 126, December **2012**, 247-253, ISSN 0960-8524
- [6] Sunja Cho, Nakyeong Lee, Seonghwan Park, Jaecheul Yu, Thanh Thao Luong, You-Kwan Oh, Taeho Lee, Microalgae cultivation for bioenergy production using wastewaters from a municipal WWTP as nutritional sources, *Bioresource Technology*, Volume 131, March **2013**, 515-520, ISSN 0960-8524
- [7] David Dah-Wei Tsai, Rameshprabu Ramaraj, Paris Honglay Chen, Growth condition study of algae function in ecosystem for CO₂ bio-fixation, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume 107, 6 February **2012**, 27-34, ISSN 1011-1344
- [8] Melissa Rickman, John Pellegrino, Jason Hock, Stephanie Shaw, Brice Freeman, Life-cycle and techno-economic analysis of utility-connected algae systems, *Algal Research*, Volume 2, Issue 1, January **2013**, 59-65, ISSN 2211-9264

- [9] Mark T. Holtzapple, Frank E. Little, William M. Moses, C.O. Patterson, Analysis of an algae-based celss: Part 2: Options and weight analysis, *Acta Astronautica*, Volume 19, Issue 4, April **1989**, 365-375, ISSN 0094-5765
- [10] Sergio D. Ríos, Carmen M. Torres, Carles Torras, Joan Salvadó, Josep M. Mateo-Sanz, Laureano Jiménez, Microalgae-based biodiesel: Economic analysis of downstream process realistic scenarios, *Bioresource Technology*, Volume 136, May **2013**, 617-625, ISSN 0960-8524
- [11] Anita Kirrolia, Narsi R. Bishnoi, Rajesh Singh, Microalgae as a boon for sustainable energy production and its future research & development aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, April **2013**, 642-656, ISSN 1364-0321
- [12] Antoine P. Trzcinski, Ernesto Hernandez, Colin Webb, A novel process for enhancing oil production in algae biorefineries through bioconversion of solid by-products, *Bioresource Technology*, Volume 116, July **2012**, 295-301, ISSN 0960-852
- [13] Yongli Zhang, Mark A. White, Lisa M. Colosi, Environmental and economic assessment of integrated systems for dairy manure treatment coupled with algae bioenergy production, *Bioresource Technology*, Volume 130, February **2013**, 486-494, ISSN 0960-8524
- [14] I. Rawat, R. Ranjith Kumar, T. Mutanda, F. Bux, Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production, *Applied Energy*, Volume 103, March **2013**, 444-467, ISSN 0306-2619
- [15] Man Kee Lam, Keat Teong Lee, Immobilization as a feasible method to simplify the separation of microalgae from water for biodiesel production, *Chemical Engineering Journal*, Volume 191, 15 May **2012**, 263-268, ISSN 1385-8947
- [16] A. Kleinová, Z. Cvengrošová, J. Rimarčík, E. Buzetzi, J. Mikulec, J. Cvengroš, Biofuels from Algae, *Procedia Engineering*, Volume 42, **2012**, 231-238, ISSN 1877-7058
- [17] Ashik Sathish, Ronald C. Sims, Biodiesel from mixed culture algae via a wet lipid extraction procedure, *Bioresource Technology*, Volume 118, August **2012**, 643-647, ISSN 0960-8524

- [18] Lin Chen, Tianzhong Liu, Wei Zhang, Xiaolin Chen, Junfeng Wang, Biodiesel production from algae oil high in free fatty acids by two-step catalytic conversion, *Bioresource Technology*, Volume 111, May **2012**, 208-214, ISSN 0960-8524
- [19] Firoz Alam, Abhijit Date, Roesfiansjah Rasjadin, Saleh Mobin, Hazim Moria, Abdul Baqui, Biofuel from Algae- Is It a Viable Alternative?, *Procedia Engineering*, Volume 49, **2012**, 221-227, ISSN 1877-7058
- [20] Tahani S. Gendy, Seham A. El-Temtamy, Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: An overview, *Egyptian Journal of Petroleum*, Available online 8 February **2013**, ISSN 1110-0621
- [21] Maurycy Daroch, Shu Geng, Guangyi Wang, Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks, *Applied Energy*, Volume 102, February **2013**, 1371-1381, ISSN 0306-2619
- [22] Gustavo B. Leite, Ahmed E.M. Abdelaziz, Patrick C. Hallenbeck, Algal biofuels: Challenges and opportunities, *Bioresource Technology*, Available online 9 February **2013**, ISSN 0960-8524
- [23] Celine Dejoye Tanzi, Maryline Abert Vian, Farid Chemat, New procedure for extraction of algal lipids from wet biomass: A green clean and scalable process, *Bioresource Technology*, Volume 134, April **2013**, 271-275, ISSN 0960-8524
- [24] Truc Linh Nguyen, D.J. Lee, J.S. Chang, J.C. Liu, Effects of ozone and peroxone on algal separation via dispersed air flotation, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Volume 105, 1 May **2013**, 246-250, ISSN 0927-7765
- [25] Ryan Davis, Andy Aden, Philip T. Pienkos, Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 10, October **2011**, 3524-3531, ISSN 0306-2619
- [26] <http://www.origo.hu/tudomany/20080701-a-szendioxid-elhelyezese-a-ccstechologia-magyarorszagon.html>
- [27] http://www.mol.hu/hu/a_molrol/sd/kornyezetunk_vedelme/eghajlatvaltozas/szen_dioxid_levalasztas_es_tarolas_ccs/

-Irodalomjegyzék-

- [28] Bert Metz; Ogunlade Davidson; Heleen de Coninck; Manuela Loos; Leo Meyer, IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Cambridge University Press, New York, NY (United States), 1. Jul. **2005**, ISBN 13-978-0-521-86643-9
- [29] CO₂ Capture Technology Overview, CO₂ Capture Project EU Roll-out, Bruxelles, 2. Jun. **2004**
- [30] Szalmásné Dr. Pécsvári Gabriella, Dinka Péter, Simon Tibor, MOL Nyrt. összefoglaló értékelés, MOL Scientific Magazine, **2007**
- [31] Hazai CO₂ elhelyezés felszíni technológiáinak vizsgálata, PE Ásványolaj és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, **2007**
- [32] <http://www.lindl-gaz.hu>
- [33] M. Sihvonen; E. Jarrenpaa; V. Hietaniemi; R.Huopalath: Trend sin Food Science and Technology, **1999**, 10, 217-222
- [34] M. Perrut: Ind.Eng.Chem.Res. **2000**, 39, 4521-4531.
- [35] R.N. Carvalho; L.S. Moura; P.T.V. Rosa; M.H.H. Merieles: J. of Supercritical Fluids, **2005**, 35, 197-204
- [36] A. Aquilera; M. Brotons; M. Rodriquez; A. Valverdi, J. Agric.: Food Chem. **2003**, 51, 5616-5621
- [37] R.L. Mendes; B.P. Nobre; M.T. Cardoso; H.P. Pereira: Inorganica CHimica Acta, **2003**, 356, 328-334
- [38] J.O. Valderrama; M. Perrut; W. Majewski: J. of Chem. And Eng. Data, **2003**, 48, (4), 827-830
- [39] W. Zhou; G. Anitescu; P.H. Rice; L.I. Tavlarides: Environ. Prog. **2004**, 23, 222-231
- [40] J.A. Field; K.Monohan; R.Reed: Anal. Chem. **1998**, 70, 1956-1962
- [41] F. Consell; C.Aymonier; H. Loppinet-Serani: Current Opinion in Solid State and Materials Science, **2003**, 7, 331-340
- [42] E. Keverchon; R. Holami: J. of Supercritical FLuids, **2006**, 37, 1-22
- [43] S. Yamaoka; M.D. Shaji Kumar; H. Kanda; M. Akaishi: J. of Crystal Growth, **2002**, 234, 5-8
- [44] H. Baiker: Chem. Rev. **1999**, 99, 453-473
- [45] P.G. Jessop: Chem. Rev. **1999**, 99, 475-493

- [46] P. Licence; J. Ke; M. Sokolova; S.K. Ross: Green Chemistry, **2003**, 5, 99-104
- [47] Cardozo K. H. M., Metabolite from Algae with Economical Impact, Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology and Pharmacology, **2007**
- [48] Ozkurt, I., Qualifying of safflower and algae for energy. Energy Educ Sci Technol A 23, **2009**, 145–151.
- [49] Grobbelaar, J. U., Algal nutrition. In: Richmond, A. (ed.). Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell, London., **2004**
- [50] Carlsson, A. S., van Beilen, J. B., Möller, R., Clayton, D., 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., **2007**
- [51] Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P., 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., **1998**
- [52] Chisti, Y., Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances 25(3), **2007**, 294-306.
- [53] Doucha, J., F. Straka, and K. Lívanský., Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. Journal of Applied Phycology 17(5), **2005**, 403-412.
- [54] Chun Yong Lim, Chia-Lung Chen, Jing-Yuan Wang, A strategy for urban outdoor production of high-concentration algal biomass for green biorefining, Bioresource Technology, Available online 17 October **2012**, ISSN 0960-8524

- [55] Hsiao-Wei Chen, Tsung-Shi Yang, Mao-Jing Chen, Yu-Ching Chang, Chai-Yi Lin, Eugene I-Chen Wang, Chen-Lung Ho, Kue-Ming Huang, Chi-Cheng Yu, Feng-Ling Yang, Shih-Hsiung Wu, Ying-Chen Lu, Louis Kuop-Ping Chao, Application of power plant flue gas in a photobioreactor to grow *Spirulina* algae, and a bioactivity analysis of the algal water-soluble polysaccharides, *Bioresource Technology*, Volume 120, September **2012**, 256-263, ISSN 0960-8524
- [56] Eleazer P. Resurreccion, Lisa M. Colosi, Mark A. White, Andres F. Clarens, Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach, *Bioresource Technology*, Volume 126, December **2012**, 298-306, ISSN 0960-8524
- [57] H. Hadiyanto, Steven Elmore, Tom Van Gerven, Andrzej Stankiewicz, Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design, *Chemical Engineering Journal*, Volume 217, 1 February **2013**, 231-239, ISSN 1385-8947
- [58] J.G.G. Jonker, A.P.C. Faaij, Techno-economic assessment of micro-algae as feedstock for renewable bio-energy production, *Applied Energy*, Volume 102, February **2013**, 461-475, ISSN 0306-2619
- [59] Tianzhong Liu, Junfeng Wang, Qiang Hu, Pengfei Cheng, Bei Ji, Jinli Liu, Yu Chen, Wei Zhang, Xiaoling Chen, Lin Chen, Lili Gao, Chunli Ji, Hui Wang, Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production, *Bioresource Technology*, Volume 127, January **2013**, 216-222, ISSN 0960-8524
- [60] Liaw Batan, Jason C. Quinn, Thomas H. Bradley, Analysis of water footprint of a photobioreactor microalgae biofuel production system from blue, green and lifecycle perspectives, *Algal Research*, Available online 8 April **2013**, ISSN 2211-9264
- [61] Diego López Barreiro, Wolter Prins, Frederik Ronsse, Wim Brilman, Hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae for biofuel production: State of the art review and future prospects, *Biomass and Bioenergy*, Available online 8 February **2013**, ISSN 0961-9534

- [62] Ryan Davis, Andy Aden, Philip T. Pienkos, Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 10, October **2011**, 3524-3531, ISSN 0306-2619
- [63] Olaizola, M., Microalgal removal of CO₂ from flue gases: changes in medium pH and flue gas composition do not appear to affect the photochemical yield of microalgal cultures. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 8(6), **2003**, 360-367.
- [64] Pedroni, P. M., G. Lamenti, G. Prosperi, L. Ritorto, G. Scolla, F. Capuano, and M. Valdiserri., Enitecnologie R&D project on microalgae biofixation of CO₂: outdoor comparative tests of biomass productivity using flue gas CO₂ from a NGCC power plant. The 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, **2004**, 1037-1042.
- [65] Becker. 1994. Algal chemical composition.
http://www.castoroil.in/reference/plant_oils/uses/fuel/sources/algae/biodiesel_algae.html. Accessed February **2008**.
- [66] Thomas Hahn, Siegmund Lang, Roland Ulber, Kai Muffler, Novel procedures for the extraction of fucoïdan from brown algae, *Process Biochemistry*, Volume 47, Issue 12, December **2012**, 1691-1698, ISSN 1359-5113
- [67] Carlsson, A. S., J.B. van Bilen, R. Möller, and D. Clayton. **2007**. Micro- and macroalgae: utility for industrial applications.
<http://www.epobio.net/pdfs/0709AquaticReport.pdf>. Accessed June **2008**.
- [68] Demao Li, Limei Chen, Dong Xu, Xiaowen Zhang, Naihao Ye, Fangjian Chen, Shulin Chen, Preparation and characteristics of bio-oil from the marine brown alga *Sargassum patens* C. Agardh, *Bioresource Technology*, Volume 104, January **2012**, 737-742, ISSN 0960-8524
- [69] Riesing, T. Cultivating algae for liquid fuel production., **2006**.
http://oakhavenpc.org/cultivating_algae.htm. Accessed February **2008**.
- [70] Roberta Becker Rodrigues, Sidinei Magela Thomaz, Photosynthetic and growth responses of *Egeria densa* to photosynthetic active radiation, *Aquatic Botany*, Volume 92, Issue 4, May **2010**, 281-284, ISSN 0304-3770,

- [71] Donat-P Häder, Markus Porst, Heike Herrmann, Jochen Schäfer, Regas Santas, Photosynthesis of the mediterranean green alga *Caulerpa prolifera* measured in the field under solar irradiation, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, Volume 37, Issues 1–2, January **1997**, 66-73, ISSN 1011-1344
- [72] Markus Porst, Heike Herrmann, Jochen Schäfer, Regas Santas, Donat-P. Häder, Photoinhibition in the Mediterranean green alga *Acetabularia mediterranea* measured in the field under solar irradiation, *Journal of Plant Physiology*, Volume 151, Issue 1, **1997**, 25-32, ISSN 0176-1617
- [73] Wenhua Liu, Yao Ming, Ping Li, Zhongwen Huang, Inhibitory effects of hypo-osmotic stress on extracellular carbonic anhydrase and photosynthetic efficiency of green alga *Dunaliella salina* possibly through reactive oxygen species formation, *Plant Physiology and Biochemistry*, Volume 54, May **2012**, 43-48, ISSN 0981-9428
- [74] Nicolausi Ssebiyonga, Svein Rune Erga, Børge Hamre, Jakob J. Stamnes, Øyvind Frette, Light conditions and photosynthetic efficiency of phytoplankton in Murchison Bay, Lake Victoria, Uganda, *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, Volume 43, Issue 3, May **2013**, 185-193, ISSN 0075-9511
- [75] Benemann, J. R. Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae – technology roadmap., **2003**.
<http://www.co2captureandstorage.info/networks/Biofixation.htm>. Accessed July **2008**.
- [76] Wang, B., Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan., CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 79(5), **2008**, 707-718
- [77] J. Pratoomyot, P. Srivilas and T. Noiraksar, Fatty acids composition of 10 microalgal species, *Songklanakarinn Journal of Science and Technology* 27 (6), **2005**, 1179–1187.
- [78] <http://www.oilgae.com/algae/oil/yield/yield.html>
- [79] G.V. Barinov, A.S. Lopukhin, R.P. Trenckenshu, Respiration energetics of marine algae for total heat production and some features of photosynthesis, *Thermochimica Acta*, Volume 309, Issues 1–2, 26 January **1998**, 133-138, ISSN 0040-6031

- [80] C. Wiencke, J. Davenport, Respiration and photosynthesis in the intertidal alga *Cladophora rupestris* (L.) Kütz. under fluctuating salinity regimes, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Volume 114, Issues 2–3, 28 January **1988**, 183-197, ISSN 0022-0981
- [81] R. Rasmont, I. Schmidt, Mise en evidence du caractere photo-sensible de la respiration des gemmules de spongillidae (Porifera), *Comparative Biochemistry and Physiology*, Volume 23, Issue 3, December **1967**, 959-967, ISSN 0010-406X
- [82] G.F. Humphrey, the photosynthesis: Respiration ratio of some unicellular marine algae, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Volume 18, Issue 2, June **1975**, 111-119, ISSN 0022-0981
- [83] Brian E Lapointe, Donald L Rice, John M Lawrence, Responses of photosynthesis, respiration, growth and cellular constituents to hypo-osmotic shock in the red alga *Gracilaria tikvahiae*, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, Volume 77, Issue 1, **1984**, 127-132, ISSN 0300-9629
- [84] Goldman, J.C., Outdoor mass algal cultures-II. photosynthetic yield limitations. *Water Research*, 11, **1979**, 119-136.
- [85] Hill W.R., Effects of light. In: Stevenson R.J., Bothwell M.L. and Lowe R.L. (eds) *Algal ecology, freshwater ecosystems*. 121-148. Academic Press, San Diego, **1996**
- [86] Grobbelaar, J., Nedbal, L., Tichy, V., Influence of high frequency light/dark fluctuations on photosynthetic characteristics of microalgae photo acclimated to different light intensities and implications for mass algal cultivation. *J. Appl. Phycol.* 8., **1996**, 335-343.
- [87] Borowitzka, M.A., Culturing microalgae in outdoor ponds. *Algal Culturing Techniques*, **2005**, 205-218.
- [88] Aaronson, S., Effect of incubation temperature on the macromolecular and lipid content of the phytoflagellate *Oshromonas danica*. *J. Phycol.* 9., **1973**, 111-113.
- [89] Shi, J., Pan, K.H., Effects of different culture conditions and growth phases on lipid of microalgae. *Marine Fisheries Research* 25(6), **2005**, 79-85.
- [90] US Patent. Pub. No. **2005/026**

-Irodalomjegyzék-

- [91] Li, Y.,Horsman,M.,Wang, B., Wu, N., Lan, C.Q., Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*. *Appl. Microbiol. Bioteshnol.* (81), **2008**, 629-636.
- [92] Boston H.L., Hill W.R., Photosynthesis-light relations of steam periphyton communities, *Limnology and Oceanography* 36, **1991**, 644-656
- [93] Mayo, A.W., Effects of temperature and pH ont he kinetic growth of unialga *Chlorella vulgaris* cultures containing bacteria. *Water Environ. Res.* 69(1), **1997**, 64-72.
- [94] Ramkumar,K.M.,Bernhard,O.P., Elemental Balancing of Biomass and Medium Composition Enhances Growth Capacity in High-Density *Chlorella vulgaris* Cultures. *Biotechnology and Bioengineering* 59 (5), **1998**, 605–611.
- [95] Yun Y-S., Park J.M., Kinetic Modeling of the Light-Dependent Photosynthetic Activity of the Green Microalga *Chlorella vulgaris*, **2003**
- [96] Paul B.J., Duthie H.C., Nutrient cycling int he epilithon of running waters. *Canadian Journal of Botany* 67, **1989**, 2302-2309
- [97] Dodds W.K., Microscale vertical profiles of N₂ fixation, photosynthesis, O₂ chlorophyll a and light in a cyanobacterial assemblage. *Applied and Environmental Microbiology* 55, **1989**, 882-886
- [98] Pinckney J., Zingmark R., Modelling intertidal benthic microalgal annual production in estuarine ecosystems. *Journal of Phycology* 29, **1993**, 396-407
- [99] Pinckney J., Zingmark R., Photophysiological responses of intertidal benthic microalgal communities to in situ light environments: Methodological considerations. *Limnology and Oceanography* 38, **1993**, 1373-1383
- [100] Adam J. Dassey, Chandra S. Theegala, Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications, *Bioresource Technology*, Volume 128, January **2013**, 241-245, ISSN 0960-8524
- [101] Jimin Lee, Dae-Hyun Cho, Rishiram Ramanan, Byung-Hyuk Kim, Hee-Mock Oh, Hee-Sik Kim, Microalgae-associated bacteria play a key role in the flocculation of *Chlorella vulgaris*, *Bioresource Technology*, Volume 131, March **2013**, 195-201, ISSN 0960-8524
- [102] algae.wur.nl **2013**

- [103] Cristiane Oliveira, Jorge Rubio, A short overview of the formation of aerated flocs and their applications in solid/liquid separation by flotation, *Minerals Engineering*, Volume 39, December **2012**, 124-132, ISSN 0892-6875
- [104] Dries Vandamme, Imogen Foubert, Ilse Fraeye, Boudewijn Meesschaert, Koenraad Muylaert, Flocculation of *Chlorella vulgaris* induced by high pH: Role of magnesium and calcium and practical implications, *Bioresource Technology*, Volume 105, February **2012**, 114-119, ISSN 0960-8524
- [105] M. Castrillo, L.M. Lucas-Salas, C. Rodríguez-Gil, D. Martínez, High pH-induced flocculation–sedimentation and effect of supernatant reuse on growth rate and lipid productivity of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*, *Bioresource Technology*, Volume 128, January **2013**, 324-329, ISSN 0960-8524
- [106] Berges J. A., Varela D. E., Harrison P. J., Effects of temperature on growth rate, cell composition and nitrogen metabolism in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae) *Marine Ecology Progress Series*, Vancouver, **2002**
- [107] Benjamin T. Smith, Robert H. Davis, Sedimentation of algae flocculated using naturally-available, magnesium-based flocculants, *Algal Research*, Volume 1, Issue 1, May **2012**, 32-39, ISSN 2211-9264
- [108] Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H., Photobioreactors for mass cultivation of algae, *Bioresource Technology*, Institute of Life Science and Bioengineering, Tsukuba City, **2008**
- [109] Zechen Wu, Yi Zhu, Weiya Huang, Chengwu Zhang, Tao Li, Yuanming Zhang, Aifen Li, Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium, *Bioresource Technology*, Volume 110, April **2012**, 496-502, ISSN 0960-8524
- [110] Andrea J. Garzon-Sanabria, Ryan T. Davis, Zivko L. Nikolov, Harvesting *Nannochloris oculata* by inorganic electrolyte flocculation: Effect of initial cell density, ionic strength, coagulant dosage, and media pH, *Bioresource Technology*, Volume 118, August **2012**, 418-424, ISSN 0960-8524
- [111] Zhao B., Zhang Y., Xiong K., Zhang Z., Hao X., Liu T., Effect of cultivation mode on microalgal growth and CO₂ fixation, *Chemical Engineering Research and Design*, **2011**

- [112] researchalgae.com **2013**
- [113] Reed, G., Klugh A. B., Correlation between Hydrogen Ion Concentration and Biota of Granite and Limestone Pools. Ecology, Vol. 5, No. 3, **1924**, 272-275., Leavitt, P. R.,
- [114] Findlay, D. L., Hall, R. I., Smol J. P., Algal responses to dissolved organic carbon loss and pH decline during whole-lake acidification: Evidence from paleolimnology. Limnol. Oceanogr., 44(3, part 2), **1999**, 757–773.
- [115] Pendersen, M. F., Hensen, P. J. Effects of high pH on the growth and survival of six marine heterotrophic protists. Mar Ecol Prog Ser. Vol. 260, **2003**, 33–41.
- [116] Richmond A., Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Publishing Ltd., **2004**, ISBN 0–632–05953–2
- [117] Knud-Hansen C.F., PhD Pound Fertilization: ecological approach and Practical application, **2006**
- [118] Stanier, R.Y., Kunisawa, R., Mandel, M., Cohen-Bazire, G., Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales). Bacteriol. Rev. 35, **1971**, 171–205
- [119] Zhenyi Du, Bing Hu, Aimin Shi, Xiaochen Ma, Yanling Cheng, Paul Chen, Yuhuan Liu, Xiangyang Lin, Roger Ruan, Cultivation of a microalga *Chlorella vulgaris* using recycled aqueous phase nutrients from hydrothermal carbonization process, Bioresource Technology, Volume 126, December **2012**, 354-357, ISSN 0960-8524
- [120] Sweetman E., Microalgae: its applications and potential. International Aqua Feed. Perendale Publishers Ltd. UK., **2009**
- [121] Report describes the future of buildings in 2050, Arup launches 'It's Alive' - a new report that describes how buildings in our cities could look and function in 2050, 04 Feb **2013**
- [122] MDOSZ-Táplálkozási Akadémia hírlevél III. évfolyam 8. szám, **2010**. augusztus
- [123] http://m.innoteka.hu/cikk/algak_a_novenytermesztesben.100.html **2013**
- [124] oilgae.com **2013**
- [125] www.enalgae.eu **2013**

- [126] Dries Vandamme, Imogen Foubert, Koenraad Muylaert, Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production, *Trends in Biotechnology*, Volume 31, Issue 4, April **2013**, 233-239, ISSN 0167-7799
- [127] Fonyó Zsolt, Fábry György, *Vegyipari Műveletti Alapismeretek*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, **2004**
- [128] Cséfalvay Edit, Deák András, Farkas Tivadar, Hanák László, Mika László Tamás, Mizsey Péter, Sawinsky János, Simándi Béla, Szánya Tibor, Székely Edit, Vágó Emese, *Vegyipari műveletek II*, Typotex Kft., **2012**
- [129] Xuezhi Zhang, Pasquale Amendola, John C. Hewson, Milton Sommerfeld, Qiang Hu, Influence of growth phase on harvesting of *Chlorella zofingiensis* by dissolved air flotation, *Bioresource Technology*, Volume 116, July **2012**, Pages 477-484, ISSN 0960-8524
- [130] Innocent Udom, Behnaz H. Zaribaf, Trina Halfhide, Benjamin Gillie, Omatoyo Dalrymple, Qiong Zhang, Sarina J. Ergas, Harvesting microalgae grown on wastewater, *Bioresource Technology*, Available online 9 April **2013**, ISSN 0960-8524
- [131] Ayhan Demirbas, Use of algae as biofuel sources, *Energy Conversion and Management* 51, **2010**, 2738–2749
- [132] I. Rawat, R. Ranjith Kumar, T. Mutanda, F. Bux, Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production, *Applied Energy* 88, **2011**, 3411–3424
- [133] Grima E.M., Belarbi E-H, Fernández F.G.An, Medina A.R., Chisti Y., Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics, *Biochnol Adv* 20, **2003**, 491-515
- [134] Uduman N., Bourniquel V., Danquah M.K., Hoadley A.F.A., A parametric study of electrocoagulation as a recovery process of marine microalgae for biodiesel production, *Chem Eng J*, 174, **2011**, 249-257
- [135] Beach, E.S., Eckelman, M.J., Cui, Z., Brentner, L., Zimmerman, J.B., Preferential technological and life cycle environmental performance of chitosan flocculation for harvesting of the green algae *Neochloris oleoabundans*. *Bioresour. Technol.* 121, **2012.**, 445–449.

- [136] Riaño, B., Molinuevo, B., García-González, M.C., Optimization of chitosan flocculation for microalgal-bacterial biomass harvesting via response surface methodology. *Ecol. Eng.* 38, **2012.**, 110–113.
- [137] Chen, F., Liu, Z., Li, D., Liu, C., Zheng, P., Chen, S., Using ammonia for algae harvesting and as nutrient in subsequent cultures. *Bioresour. Technol.* 121, **2012.**, 298–303.
- [138] Chiranjib Banerjee, Sandipta Ghosh, Gautam Sen, Sumit Mishra, Pratyosh Shukla, Rajib Bandopadhyay, Study of algal biomass harvesting using cationic guar gum from the natural plant source as flocculant, *Carbohydrate Polymers*, Volume 92, Issue 1, 30 January 2013, 675-681, ISSN 0144-8617
- [139] Schlesinger, A., Eisenstadt, D., Bar-Gil, A., Carmely, H., Einbinder, S., Gressel, J., Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production. *Biotechnol. Adv.* 30, **2012.**, 1023–1030.
- [140] S. Salim, Z. Shi, M.H. Vermuë, R.H. Wijffels, Effect of growth phase on harvesting characteristics, autoflocculation and lipid content of *Ettlia texensis* for microalgal biodiesel production, *Bioresource Technology*, Volume 138, June **2013**, 214-221, ISSN 0960-8524
- [141] Sema Şirin, Ester Clavero, Joan Salvadó, Potential pre-concentration methods for *Nannochloropsis gaditana* and a comparative study of pre-concentrated sample properties, *Bioresource Technology*, Volume 132, March **2013**, 293-304, ISSN 0960-8524
- [142] Wan, C., Zhao, X.-Q., Guo, S.-L., Asraful Alam, Md., Bai, F.-W., Bioflocculant production from *Solibacillus silvestris* W01 and its application in cost-effective harvest of marine microalga *Nannochloropsis oceanica* by flocculation. *Bioresour. Technol.*, **2012.**, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.0>.
- [143] Guo, S., Zhao, X., Wan, C., Huang, Z.-Y., Yang, Y.-L., Asraful Alam, Md., Ho, S.-H., Bai, F., Chang, J.-S., Characterization of flocculating agent from the self-flocculating microalga *Scenedesmus obliquus* AS-6-1 for efficient biomass harvest. *Bioresour. Technol.*, **2013.**, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.120>.

- [144] Kim, D.-G., La, H.-J., Ahn, C.-Y., Park, Y.-H., Oh, H.-M., Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for subsequent high-density cultures. *Bioresour. Technol.* 102, **2011.**, 3163–3168.
- [145] Jungmin Kim, Byung-Gon Ryu, Kyochan Kim, Bo-Kyong Kim, Jong-In Han, Ji-Won Yang, Continuous microalgae recovery using electrolysis: Effect of different electrode pairs and timing of polarity exchange, *Bioresource Technology*, Volume 123, November **2012**, 164-170, ISSN 0960-8524
- [146] Michele Mascia, Annalisa Vacca, Simonetta Palmas, Electrochemical treatment as a pre-oxidative step for algae removal using *Chlorella vulgaris* as a model organism and BDD anodes, *Chemical Engineering Journal*, Volume 219, 1 March **2013**, 512-519, ISSN 1385-8947
- [147] Andrew K. Lee, David M. Lewis, Peter J. Ashman, Harvesting of marine microalgae by electroflocculation: The energetics, plant design, and economics, *Applied Energy*, Volume 108, August **2013**, 45-53, ISSN 0306-2619
- [148] E. Riera-Franco de Sarabia, J.A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez-Corral, L. Elvira-Segura, I. González-Gómez, Application of high-power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes, *Ultrasonics*, Volume 38, Issues 1–8, March **2000**, 642-646
- [149] Thomas L. Tolt, Donald L. Feke, Separation of dispersed phases from liquids in acoustically driven chambers, *Chemical Engineering Science*, Volume 48, Issue 3, February **1993**, 527–540
- [150] Thea Coward, Jonathan G.M. Lee, Gary S. Caldwell, Development of a foam flotation system for harvesting microalgae biomass, *Algal Research*, Volume 2, Issue 2, March **2013**, 135-144, ISSN 2211-9264
- [151] Bertrand Barrut, Jean-Paul Blancheton, Arnaud Muller-Feuga, François René, César Narváez, Jean-Yves Champagne, Alain Grasmick, Separation efficiency of a vacuum gas lift for microalgae harvesting, *Bioresource Technology*, Volume 128, January **2013**, 235-240, ISSN 0960-8524
- [152] X.F. Sun, C.W. Wang, Y.J. Tong, W.G. Wang, J. Wei, Comparison of Microfiltration and Ultrafiltration for Algae Harvesting, *Procedia Engineering*, Volume 44, **2012**, 2108-2111, ISSN 1877-7058

- [153] Melissa Rickman, John Pellegrino, Robert Davis, Fouling phenomena during membrane filtration of microalgae, *Journal of Membrane Science*, Volumes 423–424, 15 December **2012**, 33-42, ISSN 0376-7388
- [154] S.Y. Chiu, C.Y. Kao, M.T. Tsai, S.C. Ong, C.H. Chen and C.S. Lin, Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration, *Bioresource Technology* 100, **2009**, 833–838.
- [155] M.R. Bilad, D. Vandamme, I. Foubert, K. Muylaert, Ivo F.J. Vankelecom, Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes, *Bioresource Technology*, Volume 111, May **2012**, 343-352, ISSN 0960-8524
- [156] V. Discart, M.R. Bilad, D. Vandamme, I. Foubert, K. Muylaert, I.F.J. Vankelecom, Role of transparent exopolymeric particles in membrane fouling: *Chlorella vulgaris* broth filtration, *Bioresource Technology*, Volume 129, February **2013**, 18-25, ISSN 0960-8524
- [157] Duu-Jong Lee, Gwan-Yu Chen, Yin-Ru Chang, Kueir-Rarn Lee, Harvesting of chitosan coagulated *Chlorella vulgaris* using cyclic membrane filtration-cleaning, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 43, Issue 6, November **2012**, 948-952, ISSN 1876-1070
- [158] Elizabeth Arkhangelsky, Filicia Wicaksana, Chuyang Tang, Abdulrahman A. Al-Rabiah, Saeed M. Al-Zahrani, Rong Wang, Combined organic–inorganic fouling of forward osmosis hollow fiber membranes, *Water Research*, Volume 46, Issue 19, 1 December **2012**, 6329-6338, ISSN 0043-1354
- [159] Tom De Baerdemaeker, Bert Lemmens, Chris Dotremont, Jorien Fret, Luc Roef, Koen Goiris, Ludo Diels, Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes, *Bioresource Technology*, Volume 129, February **2013**, 582-591, ISSN 0960-8524
- [160] M.R. Bilad, V. Discart, D. Vandamme, I. Foubert, K. Muylaert, Ivo F.J. Vankelecom, Harvesting microalgal biomass using a magnetically induced membrane vibration (MMV) system: filtration performance and energy consumption, *Bioresource Technology*, Available online 4 April **2013**, ISSN 0960-8524
- [161] Kuan-Yeow Show, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang, Algal biomass dehydration, *Bioresource Technology*, Available online 13 August **2012**, ISSN 0960-8524

- [162] A.L. Ahmad, N.H. Mat Yasin, C.J.C. Derek, J.K. Lim, Crossflow microfiltration of microalgae biomass for biofuel production, *Desalination*, Volume 302, 17 September **2012**, 65-70, ISSN 0011-9164
- [163] Yan Zhang, Chuyang Y. Tang, Guibai Li, The role of hydrodynamic conditions and pH on algal-rich water fouling of ultrafiltration, *Water Research*, Volume 46, Issue 15, 1 October **2012**, 4783-4789, ISSN 0043-1354
- [164] Pendersen, M. F., Hensen, P. J., Effects of high pH on the growth and survival of six marine heterotrophic protists. *Mar Ecol Prog Ser. Vol. 260*, **2003**, 33–41.
- [165] Benjamin T. Smith, Robert H. Davis, Sedimentation of algae flocculated using naturally-available, magnesium-based flocculants, *Algal Research*, Volume 1, Issue 1, May **2012**, 32-39, ISSN 2211-9264
- [166] S. Salim, Z. Shi, M.H. Vermuë, R.H. Wijffels, Effect of growth phase on harvesting characteristics, autoflocculation and lipid content of *Ettlia texensis* for microalgal biodiesel production, *Bioresource Technology*, Available online 3 April **2013**, ISSN 0960-8524
- [167] Filicia Wicaksana, Anthony G. Fane, Pharima Pongpairoj, Robert Field, Microfiltration of algae (*Chlorella sorokiniana*): Critical flux, fouling and transmission, *Journal of Membrane Science*, Volumes 387–388, 1 January **2012**, 83-92, ISSN 0376-7388
- [168] Xiaolei Zhang, Linhua Fan, Felicity A. Roddick, Influence of the characteristics of soluble algal organic matter released from *Microcystis aeruginosa* on the fouling of a ceramic microfiltration membrane, *Journal of Membrane Science*, Volumes 425–426, 1 January **2013**, 23-29, ISSN 0376-7388
- [169] S.T. Nguyen, F.A. Roddick, Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration, *Separation and Purification Technology*, Volume 103, 15 January **2013**, 313-320, ISSN 1383-5866
- [170] Sergio D. Ríos, Joan Salvadó, Xavier Farriol, Carles Torras, Antifouling microfiltration strategies to harvest microalgae for biofuel, *Bioresource Technology*, Volume 119, September **2012**, 406-418, ISSN 0960-8524

- [171] Taewoon Hwang, Seong-Jik Park, You-Kwan Oh, Naim Rashid, Jong-In Han, Harvesting of *Chlorella* sp. KR-1 using a cross-flow membrane filtration system equipped with an anti-fouling membrane, *Bioresource Technology*, Available online 1 April **2013**, ISSN 0960-8524
- [172] Catherine Charcosset, 3 - Microfiltration, *Membrane Processes in Biotechnologies and Pharmaceutics*, Elsevier, Amsterdam, **2012**, 101-141, ISBN 9780444563347
- [173] Fangshu Qu, Heng Liang, Jiayu Tian, Huarong Yu, Zhonglin Chen, Guibai Li, Ultrafiltration (UF) membrane fouling caused by cyanobacteria: Fouling effects of cells and extracellular organics matter (EOM), *Desalination*, Volume 293, 1 May **2012**, 30-37, ISSN 0011-9164
- [174] Qianhong She, Xue Jin, Qinghua Li, Chuyang Y. Tang, Relating reverse and forward solute diffusion to membrane fouling in osmotically driven membrane processes, *Water Research*, Volume 46, Issue 7, 1 May **2012**, 2478-2486, ISSN 0043-1354
- [175] Fangshu Qu, Heng Liang, Jiayu Tian, Huarong Yu, Zhonglin Chen, Guibai Li, Ultrafiltration (UF) membrane fouling caused by cyanobacteria: Fouling effects of cells and extracellular organics matter (EOM), *Desalination*, Volume 293, 1 May **2012**, 30-37, ISSN 0011-9164
- [176] Duu-Jong Lee, Guan-Yu Liao, Yin-Ru Chang, Jo-Shu Chang, Coagulation-membrane filtration of *Chlorella vulgaris*, *Bioresource Technology*, Volume 108, March **2012**, 184-189, ISSN 0960-8524
- [177] Pradeep Rajasekhar, Linhua Fan, Thang Nguyen, Felicity A. Roddick, Impact of sonication at 20 kHz on *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena circinalis* and *Chlorella* sp., *Water Research*, Volume 46, Issue 5, 1 April **2012**, 1473-1481, ISSN 0043-1354
- [178] Wenguang Zhou, Min Min, Bing Hu, Xiaochen Ma, Yuhuan Liu, Qin Wang, Jian Shi, Paul Chen, Roger Ruan, Filamentous fungi assisted bio-flocculation: A novel alternative technique for harvesting heterotrophic and autotrophic microalgal cells, *Separation and Purification Technology*, Volume 107, 2 April **2013**, 158-165, ISSN 1383-5866

- [179] Qianhong She, Xue Jin, Qinghua Li, Chuyang Y. Tang, Relating reverse and forward solute diffusion to membrane fouling in osmotically driven membrane processes, *Water Research*, Volume 46, Issue 7, 1 May **2012**, 2478-2486, ISSN 0043-1354
- [180] Martin Cerff, Michael Morweiser, Robert Dillschneider, Aymée Michel, Katharina Menzel, Clemens Posten, Harvesting fresh water and marine algae by magnetic separation: Screening of separation parameters and high gradient magnetic filtration, *Bioresource Technology*, Volume 118, August **2012**, 289-295, ISSN 0960-8524
- [181] Benjamin T. Smith, Robert H. Davis, Particle concentration using inclined sedimentation via sludge accumulation and removal for algae harvesting, *Chemical Engineering Science*, Volume 91, 22 March **2013**, 79-85, ISSN 0009-2509
- [182] Hongli Zheng, Zhen Gao, Jilong Yin, Xiaohong Tang, Xiaojun Ji, He Huang, Harvesting of microalgae by flocculation with poly (γ -glutamic acid), *Bioresource Technology*, Volume 112, May **2012**, 212-220, ISSN 0960-8524
- [183] M.G. De Morais and J.A.V. Costa, Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors, *Biotechnology Letters* 29 (9), **2007**, 1349–1352.
- [184] A. Demirbas, Progress and recent trends in biodiesel fuels, *Energy Conversion and Management* 50, **2009**, 14–34.
- [185] L. Gouveia and A.C. Oliveira, Microalgae as a raw material for biofuels production, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 36, **2009**, 269–274.
- [186] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C.Q. Lan and N. Dubois-Calero, Biofuels from microalgae, *Biotechnology Progress* 24 (4), **2008**, 815–820.
- [187] Wang, B., Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan., CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 78(4), **2008**, 617-625.
- [188] A.B.M.S. Hossain, A. Salleh, A.N. Boyce, P. Chowdhury and M. Naquiuddin, Biodiesel fuel production from algae as renewable energy, *American Journal of Biochemistry and Biotechnology* 4 (3), **2008**, 250–254.

- [189] L. Rodolfi, G.C. Zittelli, N. Bassi, G. Padovani, N. Biondi and G. Bonini et al., Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor, *Biotechnology and Bioengineering* 102 (1), **2009**, 100–112.
- [190] Q. Hu, M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz and M. Seibert et al., Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuels production: perspectives and advances, *The Plant Journal* 54, **2008**, 621–639.
- [191] J.N. Rosenberg, G.A. Oyler, L. Wilkinson and M.J. Betenbaugh, A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution, *Current Opinion in Biotechnology* 19 (5), **2008**, 430–436.
- [192] P.M. Schenk, S.R.T. Hall, E. Stephens, U.C. Marx, J.H. Mussgnug and C. Posten et al., Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production, *Bioenergy Research* 1, **2008**, 20–43.
- [193] R. Raja, S. Hemaiswarya, N.A. Kumar, S. Sridhar and R. Rengasamy, A perspective on the biotechnological potential of microalgae, *Critical Reviews in Microbiology* 34 (2), **2008**, 77–88.
- [194] John J. Milledge, Sonia Heaven, A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* **2013.**, 165-178
- [195] Mata TM, Martins AA, Caetano NS Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sust Energ Rev* 14(1), **2010**, 217–232.
- [196] Molina Grima E, Belarbi E-H, Acien-Fernandez FG, Robles-Medina A, Yusuf C Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol Adv* 20(7–8), **2003**, 491–515
- [197] Amer L, Adhikari B, Pellegrino J Technoeconomic analysis of five microalgae-to-biofuels processes of varying complexity. *Bioresour Technol* 102(20), **2011**, 9350–9359.
- [198] Uduman N, Qi Y, Danquah MK, Forde GM, Hoadley A Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *J Renew Sustain Energy* 2(1), **2010**, 012701–012715
- [199] Edzwald JK Algae, bubbles, coagulants, and dissolved air flotation. *Water Sci Technol* 27(10), **1993**, 67–81

-Irodalomjegyzék-

- [200] Nurdogan Y, Oswald WJ Tube settling of high-rate pond algae. *Water Sci Technol* 33(7), **1996**, 229–241
- [201] Collet P, Hélias A, Lardon L, Ras M, Goy R-A, Steyer J-P Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresour Technol* 102(1), **2011**, 207–214
- [202] Ras M, Lardon L, Bruno S, Bernet N, Steyer J-P Experimental study on a coupled process of production and anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris*. *Bioresour Technol* 102 (1), **2011**, 200–206
- [203] www.originoil.com **2013**
- [204] Vandamme D, Pontes SCV, Goiris K, Foubert I, Pinoy LJJ, Muylaert K Evaluation of electro-coagulation-flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae. *Biotechnol Bioeng* 108(10), **2011**, 2320–2329
- [205] Kumar HD, Yadava PK, Gaur JP Electrical flocculation of the unicellular green alga *Chlorella vulgaris* Beijerinck. *Aquat Bot*, 11, **1981**, 187-195.
- [206] Park JBK, Craggs RJ, Shilton AN Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour Technol* 102, **2011**, 35–42
- [207] Craggs R, Sutherland D, Campbell H Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production *J Appl Phycol* 24(3), **2012**, 329–337
- [208] Singh A, Nigam PS, Murphy JD Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresour Technol* 102 (1), **2011**, 26–34
- [209] Wiley P E, Brennen K J, Jacobson A E. Improved Algal Harvesting Using Suspended Air Flotation *Water Environ Res*, 81, (7), **2009**, 702-708
- [210] Chen Y M, Liu JC, Ju YH Flotation removal of algae from water *Colloids and Surfaces B*, 12, **1998** 49–55
- [211] Levin G V, Gibor A, Clendenning J R, Bogar F D Harvesting of algae by froth flotation *Applied Microbiology*, 10, **1962**, 169–175
- [212] Cowarda T, Leea J G, Caldwellb G S. Development of a foam flotation system for harvesting microalgae biomass *Algal Research* 2, **2013**, 135-144
- [213] Petrusevski B, Bolier G, Van Breemen A.N, Alaerts GJ Tangential flow filtration: A method to concentrate freshwater algae. *Water Res.* 29, **1995**, 1419-1424

-Irodalomjegyzék-

- [214] Rossignol N, Vandanjon L, Jaouen P, Quemeneur F Membranetechnology for the continuous separation microalgae/culturemedium: compared performances of cross-flow microfiltrationand ultra-filtration. *Aquacult Eng* 20, **1999**, 191–208
- [215] De Baerdemaeker T, Lemmens B, Dotremont C, Fret J, Roef L, Goiris K, Diels L. Benchmark study on algae harvesting with backwashable submerged flat panel membranes.*Bioresource Technology*, 129, **2013**, 582-591
- [216] Bilad MR, Vandamme D, Foubert I, Muylaert K, Vankelecom IF. Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes. *Bioresource Technology*, 111, **2012**, 343-352
- [217] www.evodus.eu **2013**
- [218] E.W. Becker (E. Wolfgang) *Microalgae: biotechnology and microbiology*, ISBN 0-521-35020-4, Cambridge University Press, **1994**, 153-154
- [219] A. Sukenik, G. Shelef, Algal autoflocculation-verification and proposed mechanism, *Biotechnology and bioengineering*, **1984**, 142-7

Függelék

F1. Magyarországon deponálható CO ₂ mennyiség.....	167
F2. Néhány alga kémiai összetétele	167
F3. Különböző növények olajtermelő képessége.....	168
F4. Különböző mikroalgák lipid tartalma és termelékenységi adatai	168
F5. Füstgázok CO ₂ -megkötésére használható algák és fontosabb jellemzőik	171
F6. A BG-11 tápoldat összetétele	172
F7. A <i>Chlorella vulgaris</i> elemi összetétele.....	173
F8. Kiindulási szuszpenziómennyiségekből elért végkoncentrációk [151]	173
F9. <i>Chlorella vulgaris beij.</i> mikroszkópi képe	174
F10. <i>Chlorella vulgaris</i> mikroszkópi képe	174
F11. <i>Chlorella vulgaris</i> mikroszkópi képe, nílusvörös festés.....	175
F12. <i>Scenedesmus acutus meyen</i> mikroszkópi képe.....	175
F13. <i>Scenedesmus armatus chodat</i> mikroszkópi képe	176
F14. Mütek Particle Charge Detector.....	176
F15. Laboratóriumi tenyésztőrendszer, 10 dm ³ -es reaktoregységekből..	177
F16. Tetőn installált foto-bioreaktorok.....	178
F17. Pilot foto-bioreaktorok ipari környezetben (MOL Nyrt. Dunai finomító) ...	179
F18. A membránszeparációs méréshez használt készülék	180
F19. A ZW-10 membránmodul felépítése	180
F20. GreenFuel Technologies Corporation cég berendezése és adatai.....	181
F21. A szén-dioxid betáplálás megszüntetésének hatása.....	182
F22. Nyomás alatti FCCD kísérlet összefoglaló táblázata.....	183
F23.a Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata	184
F23.b Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata	185
F23.c Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata.....	186
F23.d Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata	187
F24. Membránszeparációs adatsorozat	188
F25. Permeátum tápközegként történő felhasználásának vizsgálata.....	189

F1. Magyarországon deponálható CO₂ mennyiség

Tároló típus	CO ₂ kapacitás [10 ⁶ t]
Mély sósvizes formációk	25.000
Szenes rétegek	717
Szénhidrogén mezők	469

F2. Néhány alga kémiai összetétele m/m %-ban szárazanyagra vonatkoztatva

Mikroalga	Protein	Szénhidrát	Lipidek	Nuklein sav
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14	3-6
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	1.9	-
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8-18	21-52	16-40	-
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22	4-5
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2	-
<i>Spirogyra sp.</i>	6-20	33-64	11-21	-
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8	-
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6	-
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20	-
<i>Prymnesium parvum</i>	28-45	25-33	22-38	1-2
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3	-
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14	-
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9	2-5
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7	3-4.5
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11	5
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7	-

- Függelék -

F3. Különböző növények olajtermelő képessége

Növény	Olaj, liter/hektár/év
Szója	440
Napraforgó	900
Repce	1.150
Olajpálma	5.700
Mikroalga	40.000* -----135.000**

* 30 m/m% lipid, ** 70 m/m% lipid

F4. Különböző mikroalgák lipid tartalma és termelékenységi adatai

Mikroalga	Lipid tartalom (m/m% sz.a.)	Lipid tömeg termelékenység térfogatra (mg/L/nap)	Alga tömeg termelékenység térfogatra (g/L/nap)	Alga tömeg termelékenység felületre (g/m ² /nap)
<i>Ankistrodesmus sp.</i>	24.0–31.0	–	–	11.5–17.4
<i>Botryococcus braunii</i>	25.0–75.0	–	0.02	3.0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	21.8	0.07	–
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14.6–16.4/39.8	17.6	0.04	–
<i>Chlorella emersonii</i>	25.0–63.0	10.3–50.0	0.036–0.041	0.91–0.97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14.6–57.8	1214	2.00–7.70	–
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19.0–22.0	44.7	0.23–1.47	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0–58.0	11.2–40.0	0.02–0.20	0.57–0.95
<i>Chlorella sp.</i>	10.0–48.0	42.1	0.02–2.5	1.61–16.47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2.0	–	2.90–3.64	72.5/130
<i>Chlorella</i>	18.0–57.0	18.7	–	3.50–13.90
<i>Chlorococcum sp.</i>	19.3	53.7	0.28	–

- Függelék -

Mikroalga	Lipid tartalom (m/m% sz.a.)	Lipid tömeg termelékenység térfogatra (mg/L/nap)	Alga tömeg termelékenység térfogatra (g/L/nap)	Alga tömeg termelékenység felületre (g/m ² /nap)
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20.0–51.1	–	10	–
<i>Dunaliella salina</i>	6.0–25.0	116.0	0.22–0.34	1.6–3.5/20–38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23.1	–	0.09	14
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16.7–71.0	–	0.12	–
<i>Dunaliella sp.</i>	17.5–67.0	33.5	–	–
<i>Ellipsoidion sp.</i>	27.4	47.3	0.17	–
<i>Euglena gracilis</i>	14.0–20.0	–	7.70	–
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.0	–	0.05–0.06	10.2–36.4
<i>Isochrysis galbana</i>	7.0–40.0	–	0.32–1.60	–
<i>Isochrysis sp.</i>	7.1–33	37.8	0.08–0.17	–
<i>Monodus subterraneus</i>	16.0	30.4	0.19	–
<i>Monallanthus salina</i>	20.0–22.0	–	0.08	12
<i>Nannochloris sp.</i>	20.0–56.0	60.9–76.5	0.17–0.51	–
<i>Nannochloropsis oculata.</i>	22.7–29.7	84.0–142.0	0.37–0.48	–
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12.0–53.0	37.6–90.0	0.17–1.43	1.9–5.3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.0–65.0	90.0–134.0	–	–
<i>Nitzschia sp.</i>	16.0–47.0	–	–	8.8–21.6
<i>Oocystis pusilla</i>	10.5	–	–	40.6–45.8
<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4	0.16	–
<i>Pavlova lutheri</i>	35.5	40.2	0.14	–

- Függelék -

Mikroalga	Lipid tartalom (m/m% sz.a.)	Lipid tömeg termelékenység térfogatra (mg/L/nap)	Alga tömeg termelékenység térfogatra (g/L/nap)	Alga tömeg termelékenység felületre (g/m ² /nap)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18.0–57.0	44.8	0.003–1.9	2.4–21
<i>Porphyridium cruentum</i>	9.0–18.8/60.7	34.8	0.36–1.50	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0–55.0	–	0.004–0.74	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9–18.4	35.1	0.19	–
<i>Scenedesmus sp.</i>	19.6–21.1	40.8–53.9	0.03–0.26	2.43–13.52
<i>Skeletonema sp.</i>	13.3–31.8	27.3	0.09	–
<i>Skeletonema costatum</i>	13.5–51.3	17.4	0.08	–
<i>Spirulina platensis</i>	4.0–16.6	–	0.06–4.3	1.5–14.5/24–51
<i>Spirulina maxima</i>	4.0–9.0	–	0.21–0.25	25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20.6	17.4	0.08	–
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5–23.0	27.0–36.4	0.12–0.32	19
<i>Tetraselmis sp.</i>	12.6–14.7	43.4	0.30	–

- Függelék -

F5. Füstgázok CO₂-megkötésére használható algák és fontosabb jellemzőik (SO_x, NO_x max. 150 ppm is lehet)

Mikroalga	CO ₂ térf.%	T, °C	P g/L/day	P _{CO2} g/L/day	Megjegyzés
<i>Chlorella kessleri</i>	12	-	0.087	-	-
<i>Chlorella kessleri</i>	18	30	0.087	0.163 ^a	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	15	-	N/A	0.624	Mesterséges szennyvízen
<i>Chlorella vulgaris</i>	levegő	25	0.040	0.075 ^a	Steril tápoldaton
<i>Chlorella vulgaris</i>	levegő	25	0.024	0.045 ^a	Alacsony nitrogén tartalmú tápoldat
<i>Dunaliella</i>	3	27	0.17	0.313 ^a	Magas sótartalmú tápoldat
<i>Haematococcus pluvialis</i>	16-34	20	0.076	0.143	Pilot-méretű, szabadba telepített
<i>Scenedesmus obliquus</i>	levegő	-	0.009	0.016	Szennyvíz, szabadba telepített, télen
<i>Scenedesmus obliquus</i>	levegő	-	0.016	0.031	Szennyvíz, szabadba telepített, nyáron
<i>Scenedesmus obliquus</i>	6 – 12	30	0.14	-	Három fokozatú, csőszerű, foto- bioreaktor, maximális növekedési sebesség: 0.22/nap
<i>Scenedesmus obliquus</i>	18	30	0.14	0.26	-
<i>Botryococcus braunii</i>	-	25-30	1.1	>1.0	Szénhidrogének felhalmozása Maximális növekedési sebesség:
<i>Spirulina sp.</i>	6 -- 12	30	0.22	0.413	0.44/nap, maximális algamassza koncentráció: 3.5 g száraz anyag/L

F6. A BG-11 tápoldat összetétele

Makroelem-tartalom			
Komponens	Alapoldat [g/dm³ dH₂O]	Használt mennyiség	Tápoldat végső koncentrációja [mg/l]
Fe citrát oldat		1,0 ml	
Citromsav	6	1,0 ml	6,0
Vas ammónium citrát	6	1,0 ml	6,0
NaNO ₃	-	1,5 g	1,5
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	40	1,0 ml	40,0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	75	1,0 ml	75,0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	36	1,0 ml	36,0
Na ₂ CO ₃	20	1,0 ml	20,0
MgNa ₂ EDTA·H ₂ O	1.0	1,0 ml	1,0
Nyomelemek		1,0 ml	
Nyomelemek, mikroelemek			
Komponens	Alapoldat [g/dm³ dH₂O]		Tápoldat végső koncentrációja [mg/l]
H ₃ BO ₃	2,8600		2,8600
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1,8100		1,8100
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,2200		0,2200
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,0790		0,0790
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0,3910		0,3910
Co(NO) ₃ ·6H ₂ O	0,0494		0,0494

F7. A *Chlorella vulgaris* elemi összetétele

Elem	m/m % tartomány
szén	51,4-72,6
oxigén	11,6-28,5
hidrogén	7,0-10,0
nitrogén	6,2-7,7
foszfor	1,0-2,0
kálium	0,85-1,62
magnézium	0,36-0,80
kén	0,28-0,39
vas	0,04-0,55
kalcium	0,005-0,08
cink	0,0006-0,005
réz	0,001-0,004
mangán	0,002-0,01

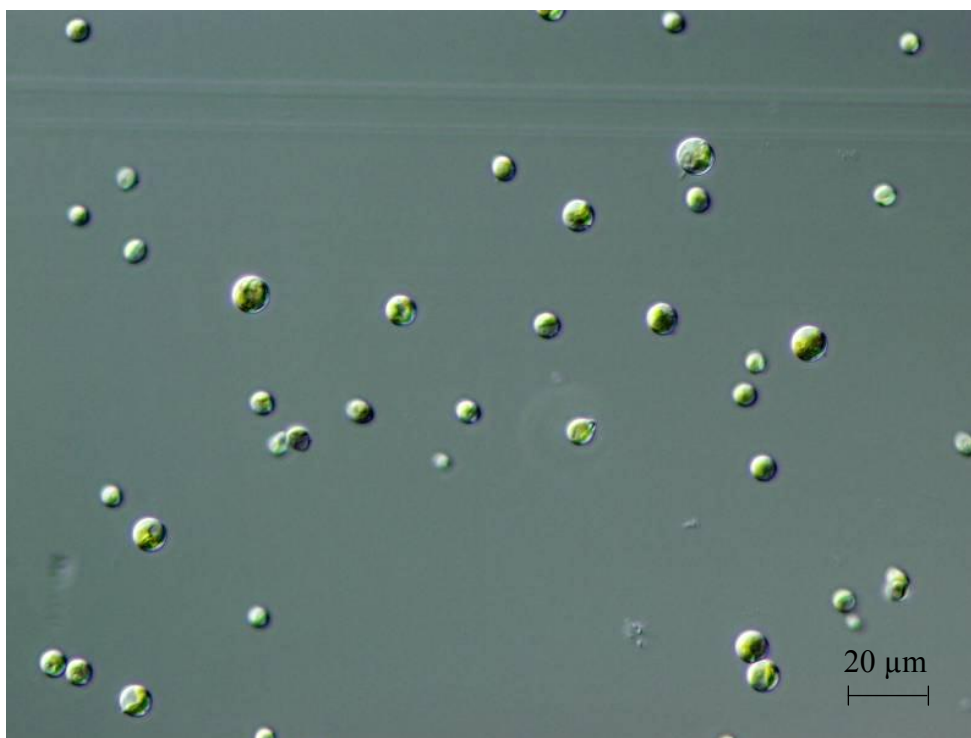
F8. Kiindulási szuszpenziómennyiségekből elért végkoncentrációk Barrut és munkatársainak (2013) mérései alapján [151]

Szeparációs mennyiség [dm ³]	Végző koncentráció [g/dm ³]
1	50,4
2	43,4
20	8,4
40	5,5
100	3,8

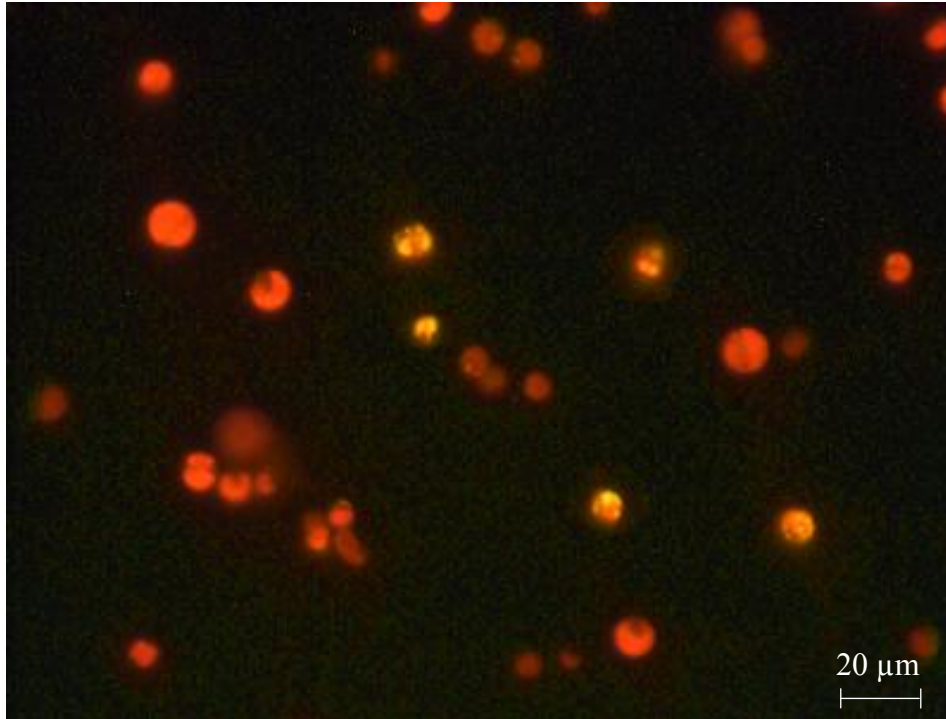
F9. *Chlorella vulgaris* *beij.* mikroszkópi képe (0-jelű törzs) [MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztály]



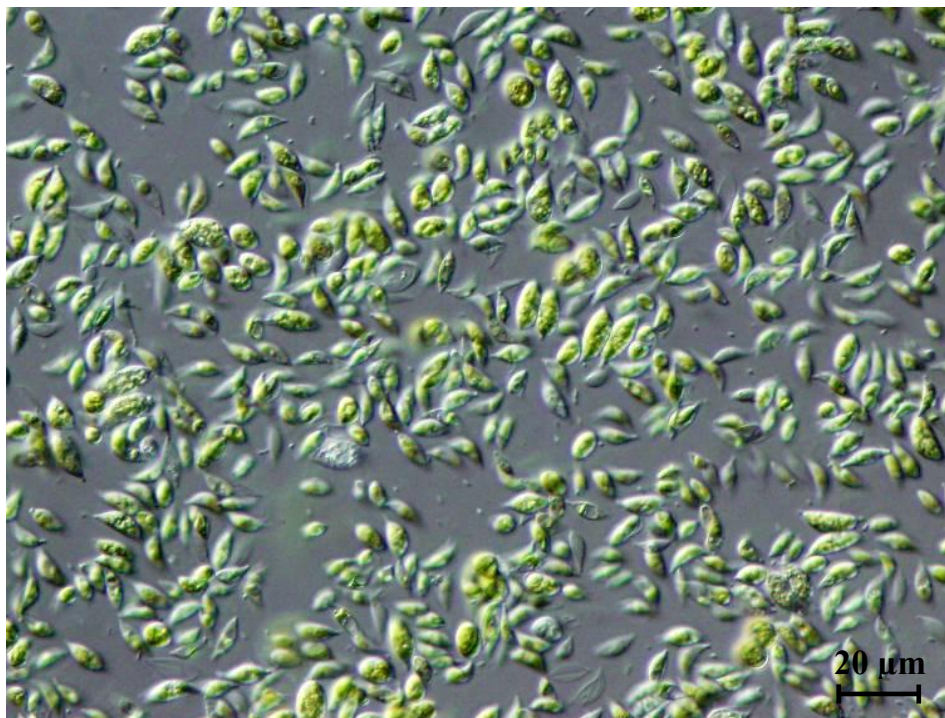
F10. *Chlorella vulgaris* mikroszkópi képe (17-jelű törzs) [MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztály]



F11. *Chlorella vulgaris* (17-jelű törzs) mikroszkópi képe, nilusvörös festés. A kloroplasztisz vörösen, a lipidcseppek sárgán fluoreszkálnak [MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztály]



F12. *Scenedesmus acutus meyen* (31-jelű törzs) mikroszkópi képe [MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztály]



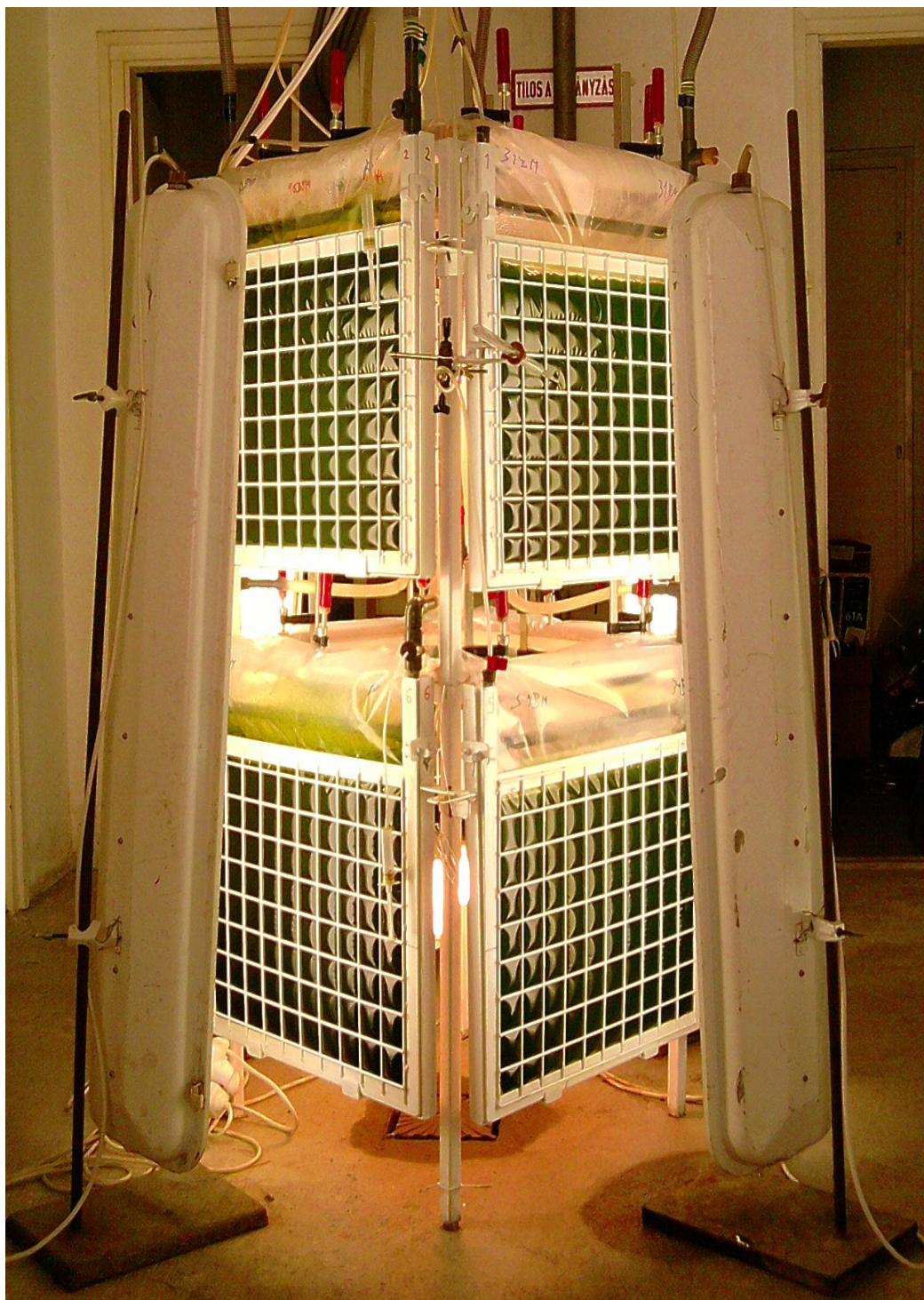
F13. *Scenedesmus armatus chodat* (59-jelű törzs) mikroszkópi képe [MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet Hidrobotanikai Osztály]



F14. Mütek Particle Charge Detector



F15. Laboratóriumi tenyésztőreaktor rendszer, 10 dm³-es reaktoregységekből



F16. Tetőn installált foto-bioreaktorok



F17. Pilot foto-bioreaktorok ipari környezetben (MOL Nyrt. Dunai finomító)

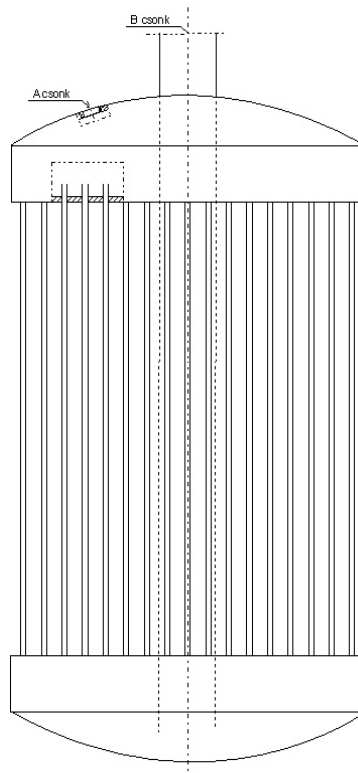


- Függelék -

F18. A membránseparációs méréshez használt készülék



F19. A ZW-10 membránmodul felépítése (A csonk - permeátum elvétel, B csonk - levegő befűvás)



F20. GreenFuel Technologies Corporation cég berendezése és adatai

Greenfuel Technollogies Corporation már érdeemben foglalkozott ezzel a témával ahogy azt a fenti példán is láthattuk, és évek óta működik ilyen jellegű bioreaktoruk. Doktor Isaac Berzin technológiai vezető a GreenFuel Technologies Corporation-nél Cambridgeben kezdett el fejleszteni egy bioreaktort, ami csökkenteni tudja a CO₂ és NO_x kibocsátást. Ez a rendszer sikeresnek bizonyult egy 20 MW-os erőmű mellé telepítve.

A GreenFuel társaság reaktora a következőképpen épül fel: egy háromszöghöz hasonló szerkezet, amelyre 2-3 m hosszú, 10-20 cm-es átmérővel rendelkező polikarbonát csövek vannak felszerelve.

A háromszöges kialakítás miatt kellő mennyiségű fényt kap a szerkezet, és a keverés is könnyen megvalósítható a bevezetett gáz segítségével. A gáz 13 % CO₂ tartalommal kerül bevezetésre a reaktorba. Ez a CO₂ elnyelődik az algában, és emiatt a reaktor tetejéből kilépő gáz már tiszta. Az ezen az úton nyert biomasszából a következő termékeket állítják elő: biodízel, gyógyszerészeti és kozmetikai alapanyagok.

A készülék, állításuk szerint olyan térségekben is jól alkalmazható, ahol gyengébb, kisebb mértékű a napsugárzás, ennek csak némi hatásfok-csökkenés lesz a következménye. Ennek a hatásfok-csökkenésnek a mértéke még vizsgálat tárgyát képezi, de feltételezések szerint 10 % a várható értéke.

A társaság, mérésekkel tudja igazolni a CO₂ illetve NO_x csökkenést a kísérleti telep környezetében.



GreenFuel Technologies Corporation bioreaktora

F21. A szén-dioxid betáplálás megszüntetésének hatása

Minta azonosító	Algatörzs	pH _{szuszpenzió}	C _{alga} [g/dm ³]	Ülepedési sebesség [mm/h]	Megjegyzés (szaporodási görbe fázisa)
CM1	31	6,8	3,6	2,8	I. köztes, log
CM2	31	7,0	3,2	3,1	I. köztes, log
CM3	31	6,8	4,4	4,9	stacioner
CM4	31	7,0	3,1	5,4	stacioner
CM5	31	7,2	3,4	6,8	elhalási
CM6	31	7,2	5,4	3,8	elhalási
CM7	MOL21	6,6	1,2	2,5	I. köztes, log
CM8	MOL21	6,8	1,4	3,9	I. köztes, log
CM9	MOL21	7,0	1,8	5,7	stacioner
CM10	MOL21	7,0	0,9	2,9	stacioner
CM11	MOL21	6,6	1,9	3,4	elhalási
CM12	MOL21	6,8	2,3	6,5	elhalási
CM13	4/d	7,4	1,6	3,9	I. köztes, log
CM14	4/d	7,2	1,2	3,8	I. köztes, log
CM15	4/d	7,2	1,8	5,6	stacioner
CM16	4/d	7,6	2,0	5,8	stacioner
CM17	4/d	7,8	1,1	7,1	elhalási
CM18	4/d	6,6	1,3	4,8	elhalási

F22. Nyomás alatti FCCD kísérlet összefoglaló táblázata (töltéssűrűség értékek [$\mu\text{eq/g}$], zöld szín az ülepedő minták adatait jelöli)

		Modulhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]																			
		15					20					30					35				
		Modulnyomás [bar]																			
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
E1	Felső fázis	104	201	168	303	261	84	54	56	311	108	96	18	40	113	164	162	45	193	98	224
	Alsó fázis	126	292	183	331	269	166	182	177	330	115	119	152	160	150	200	188	94	255	138	356
E2	Felső fázis	80	46	77	190	87	72	62	58	298	196	163	60	49	218	118	241	69	271	77	155
	Alsó fázis	89	81	97	182	109	117	156	198	304	239	198	181	180	352	132	265	127	306	169	236
E3	Felső fázis	130	200	91	97	173	92	34	63	201	99	86	57	61	179	120	284	63	202	59	91
	Alsó fázis	146	214	105	92	183	130	206	331	196	123	121	193	178	186	165	331	84	287	138	130
		RRTM (Alsó fázis töltéssűrűsége/Felső fázis töltéssűrűsége)																			
E1		1,2	1,5	1,1	1,1	1,0	2,0	3,4	3,2	1,1	1,1	1,2	8,4	4,0	1,3	1,2	1,2	2,1	1,3	1,4	1,6
E2		1,1	1,8	1,3	1,0	1,3	1,6	2,5	3,4	1,0	1,2	1,2	3,0	3,7	1,6	1,1	1,1	1,8	1,1	2,2	1,5
E3		1,1	1,1	1,2	0,9	1,1	1,4	6,1	5,3	1,0	1,2	1,4	3,4	2,9	1,0	1,4	1,2	1,3	1,4	2,3	1,4

F23.a Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata (töltéssűrűség értékek [$\mu\text{eq/g}$], zöld szín az ülepedő minták adatait jelöli)

		Gázösszetétel CO ₂ -ra 25 %															
		Modulhőmérséklet [°C]															
		15				20				30				35			
		Áramoltatási idő [h]															
		6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36
E4	Felső fázis	165	132	114	286	117	210	97	209	91	126	128	116	116	187	191	195
	Alsó fázis	263	176	199	284	206	269	111	216	167	243	265	212	207	191	218	218
E5	Felső fázis	203	162	167	183	171	164	91	128	97	115	132	160	236	196	111	-
	Alsó fázis	211	165	183	199	198	164	178	187	147	276	177	169	268	294	297	-
E6	Felső fázis	282	147	208	217	221	99	61	214	77	76	74	134	84	81	-	-
	Alsó fázis	282	206	226	284	247	142	109	362	132	120	169	200	169	201	-	-
		RRTM (Alsó fázis töltéssűrűsége/Felső fázis töltéssűrűsége)															
	E1	1,6	1,3	1,7	1,0	1,8	1,3	1,1	1,0	1,8	1,9	2,1	1,8	1,8	1,0	1,1	1,1
	E2	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,0	2,0	1,5	1,5	2,4	1,3	1,1	1,1	1,5	2,7	-
	E3	1,0	1,4	1,1	1,3	1,1	1,4	1,8	1,7	1,7	1,6	2,3	1,5	2,0	2,5	-	-

- Függelék -

F23.b Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata (töltéssűrűség értékek [$\mu\text{eq/g}$], zöld szín az ülepedő minták adatait jelöli)

		Gázösszetétel CO ₂ -ra 50 %															
		Modulhőmérséklet [°C]															
		15				20				30				35			
		Áramoltatási idő [h]															
		6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36
E4	Felső fázis	199	212	286	304	163	196	130	205	116	159	55	-	305	208	55	-
	Alsó fázis	278	308	299	305	244	277	288	298	172	155	152	-	312	329	136	-
E5	Felső fázis	78	97	80	76	208	316	226	257	130	113	102	122	215	242	206	36
	Alsó fázis	188	163	169	165	216	318	294	262	139	188	161	311	338	329	341	144
E6	Felső fázis	240	198	287	281	277	223	305	246	143	119	136	102	161	126	200	52
	Alsó fázis	244	261	201	209	284	159	328	287	212	176	178	318	165	182	188	137
		RRTM (Alsó fázis töltéssűrűsége/Felső fázis töltéssűrűsége)															
	E1	1,4	1,5	1,0	1,0	1,5	1,4	2,2	1,5	1,5	1,0	2,8	-	1,0	1,6	2,5	-
	E2	2,4	1,7	2,1	2,2	1,0	1,0	1,3	1,0	1,1	1,7	1,6	2,5	1,6	1,4	1,7	4,0
	E3	1,0	1,3	0,7	0,7	1,0	0,7	1,1	1,2	1,5	1,5	1,3	3,1	1,0	1,4	0,9	2,6

F23.c Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata (töltéssűrűség értékek [$\mu\text{eq/g}$], zöld szín az ülepedő minták adatait jelöli)

		Gázösszetétel CO ₂ -ra 75 %															
		Modulhőmérséklet [°C]															
		15				20				30				35			
		Áramoltatási idő [h]															
		6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36
E4	Felső fázis	356	294	318	245	329	128	55	-	148	121	46	-	190	87	-	-
	Alsó fázis	351	318	336	295	324	303	188	-	293	274	144	-	312	224	-	-
E5	Felső fázis	214	150	162	290	81	217	42	-	152	247	76	-	160	43	-	-
	Alsó fázis	322	338	285	291	172	288	176	-	323	333	199	-	357	108	-	-
E6	Felső fázis	179	198	203	119	200	199	211	210	263	297	48	-	289	82	-	-
	Alsó fázis	272	286	238	227	223	302	296	258	262	286	179	-	230	326	-	-
		RRTM (Alsó fázis töltéssűrűsége/Felső fázis töltéssűrűsége)															
	E1	1,0	1,1	1,1	1,2	1,0	2,4	3,4	-	2,0	2,3	3,1	-	1,6	2,6	-	-
	E2	1,5	2,3	1,8	1,0	2,1	1,3	4,2	-	2,1	1,3	2,6	-	2,2	2,5	-	-
	E3	1,5	1,4	1,2	1,9	1,1	1,5	1,4	1,2	1,0	1,0	3,7	-	0,8	4,0	-	-

- Függelék -

F23.d Átáramoltatásos FCCD kísérlet összefoglaló táblázata (töltéssűrűség értékek [$\mu\text{eq/g}$], zöld szín az ülepedő minták adatait jelöli)

		Gázösszetétel CO ₂ -ra 100 %															
		Modulhőmérséklet [°C]															
		15				20				30				35			
		Áramoltatási idő [h]															
		6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36	6	12	24	36
E4	Felső fázis	199	213	140	187	300	137	56	-	132	18	-	-	187	45	-	-
	Alsó fázis	286	315	292	338	320	261	177	-	293	152	-	-	285	94	-	-
E5	Felső fázis	144	176	199	218	141	174	58	-	188	60	-	-	241	69	-	-
	Alsó fázis	312	282	340	327	287	292	198	-	274	181	-	-	322	127	-	-
E6	Felső fázis	280	137	219	152	121	34	-	-	228	57	-	-	220	63	-	-
	Alsó fázis	324	296	303	351	276	206	-	-	345	193	-	-	337	84	-	-
		RRTM (Alsó fázis töltéssűrűsége/Felső fázis töltéssűrűsége)															
	E1	1,4	1,5	2,1	1,8	1,1	1,9	3,2	-	2,2	8,4	-	-	1,5	2,1	-	-
	E2	2,2	1,6	1,7	1,5	2,0	1,7	3,4	-	1,5	3,0	-	-	1,3	1,8	-	-
	E3	1,2	2,2	1,4	2,3	2,3	6,1	-	-	1,5	3,4	-	-	1,5	1,3	-	-

- Függelék -

F24. Membránszeparációs adatsorozat

Q_v [dm ³ /h]	Szűrés időtartama [h]	Q_v (*10 ⁻³ [m ³ /s])	Szűrés időtartama [s]	Szűrletfluxus [dm ³ /m ² h]	Dp [bar]	NWP [dm ³ /m ² hbar]
25,710	0,778	0,007	2800,8	28,563	0,2	142,815
23,360	0,856	0,006	3081,6	25,961	0,2	129,805
25,350	0,789	0,007	2840,4	28,165	0,2	140,825
23,090	0,866	0,006	3117,6	25,661	0,2	128,305
24,200	0,826	0,007	2973,6	26,903	0,2	134,515
24,560	0,814	0,007	2930,4	27,300	0,2	136,500
23,290	0,859	0,006	3092,4	25,870	0,3	86,233
20,230	0,989	0,006	3560,4	22,469	0,3	74,897
24,000	0,833	0,007	2998,8	26,677	0,4	66,693
22,220	0,900	0,006	3240,0	24,691	0,4	61,728
22,500	0,889	0,006	3200,4	24,997	0,4	62,493
21,530	0,929	0,006	3344,4	23,921	0,4	59,803
20,780	0,962	0,006	3463,2	23,100	0,4	57,750
20,000	1,000	0,006	3600,0	22,222	0,4	55,555
19,820	1,009	0,006	3632,4	22,024	0,4	55,060
20,225	0,989	0,006	3560,4	22,469	0,4	56,173
19,565	1,022	0,005	3679,2	21,744	0,4	54,360
20,000	1,000	0,006	3600,0	22,222	0,4	55,555
22,220	0,900	0,006	3240,0	24,691	0,4	61,728
20,930	0,956	0,006	3441,6	23,245	0,4	58,113
22,500	0,889	0,006	3200,4	24,997	0,4	62,493
18,557	1,078	0,005	3880,8	20,614	0,5	41,228
16,981	1,178	0,005	4240,8	18,864	0,5	37,728
17,476	1,144	0,005	4118,4	19,425	0,5	38,850
16,981	1,178	0,005	4240,8	18,864	0,5	37,728

F25. Permeátum tápközegként történő felhasználásának vizsgálata

Tápközeg jellege	Kiind. Konc. [g/dm ³]	Elért. Konc. [g/dm ³]	Szaporulat [g/1 hét]	Termesztési hatásfok [%]	
friss	0,9165	4,1374	3,2209	100,00	*
elsődleges	0,8199	3,8158	2,9959	93,01	
másodlagos	1,3045	4,2720	2,9675	92,13	
harmadlagos	1,0010	1,6001	0,5991	18,60	
negyedleges	1,0689	1,6820	0,6131	19,04	
friss	0,9903	5,6691	4,6788	100,00	*
elsődleges	1,2508	5,5829	4,3321	92,59	
másodlagos	0,6902	4,9344	4,2442	90,71	
harmadlagos	0,8445	3,8503	3,0058	64,24	
negyedleges	1,4230	2,5611	1,1381	24,32	
friss	0,8891	3,4785	2,5894	100,00	*
elsődleges	1,2014	3,4761	2,2747	87,85	
másodlagos	1,1010	3,4521	2,3511	90,80	
harmadlagos	0,8594	1,9000	1,0406	40,19	
negyedleges	1,6706	1,5900	-0,0806	-3,11	
friss	0,8976	2,6543	1,7567	100,00	*
elsődleges	1,0060	2,7198	1,7138	97,56	
másodlagos	1,3243	2,9203	1,5960	90,85	
harmadlagos	1,1501	1,1270	-0,0231	-1,31	
negyedleges	0,9984	1,0000	0,0016	0,09	

* referenciák általam definiált értéke 100 % az adott kísérletben