

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

TOLNER IMRE TIBOR

**SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
MEZŐGAZDASÁG- ÉS ÉLELMISZERTUDOMÁNYI KAR**

**MOSONMAGYARÓVÁR
2019**

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
MEZŐGAZDASÁG- ÉS ÉLELMISZERTUDOMÁNYI KAR
MOSONMAGYARÓVÁR

BIOLÓGIAI RENDSZEREK ÉS ÉLELMISZERIPARI MŰSZAKI TANSZÉK

WITTMANN ANTAL NÖVÉNY-, ÁLLAT- ÉS ÉLELMISZER-TUDOMÁNYI
MULTIDISZCIPLINÁRIS DOKTORI ISKOLA

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

PROF. DR. ÖRDÖG VINCE, DSC
EGYETEMI TANÁR, AZ MTA DOKTORA

HABERLANDT GOTTLIEB NÖVÉNYTUDOMÁNYI DOKTORI PROGRAM

ALPROGRAM VEZETŐ:

PROF. DR. ÖRDÖG VINCE, DSC
EGYETEMI TANÁR, AZ MTA DOKTORA

TÉMA VEZETŐK:

PROF. DR. NEMÉNYI MIKLÓS, MHAS
AZ MTA RENDES TAGJA

PROF. DR. FENYVESI LÁSZLÓ, PHD
EGYETEMI TANÁR

KINEMATIKAI SZIMULÁCIÓK, MÉRÉSEK EGY MODELL CSÖVES

ALGATERMESZTŐ BERENDEZÉSBN

Készítette:

TOLNER IMRE TIBOR
DOKTORJELŐLT

MOSONMAGYARÓVÁR
2019

**KINEMATIKAI SZIMULÁCIÓK, MÉRÉSEK EGY MODELL CSÖVES
ALGATERMESZTŐ BERENDEZÉSÉBEN**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében a Széchenyi István Egyetem
Wittmann Antal Növény-, Állat és Élelmiszer - Tudományi Doktori Iskolája
Haberlandt Gottlieb Növénytudományi Doktori Program

Írta:

Tolner Imre Tibor

Készült a Wittmann Antal Növény-, Állat- és Élelmiszer- tudományi Multidiszciplináris
Doktori Iskola
Haberlandt Gottlieb Növénytudományi Doktori Programja keretében.

Téma Vezetők:

.....
Prof. Dr. Neményi Miklós, MHAS
az MTA rendes tagja

Elfogadásra javasolom: Igen / Nem

.....
Prof. Dr. Fenyvesi László, PhD
egyetemi tanár

Elfogadásra javasolom: Igen / Nem

A jelölt a doktori szigorlaton %-ot ért el,

Mosonmagyaróvár:
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értékelést bírálóként elfogadásra javasolom:

.....
Első bíráló:

Elfogadásra javasolom: Igen / Nem

.....
Második bíráló:

Elfogadásra javasolom: Igen / Nem

.....
Harmadik bíráló:

Elfogadásra javasolom: Igen / Nem

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján %-ot ért el,

Mosonmagyaróvár:
a Szigorlati Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése,

Mosonmagyaróvár:
Az EDHT elnöke

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	7
KIVONAT	11
ABSTRACT	13
BEVEZETÉS	15
CÉLKITŰZÉSEK	19
IRODALMI ÁTTEKINTÉS	21
1. A MIKROALGÁKRÓL ÁLTALÁBAN.....	21
1.1. ALGA, MINT ÉLŐ SZERVEZET.....	21
1.2. MIKROALGA NÖVEKEDÉS OPTIMÁLIS TÉNYEZŐI.....	21
1.2.1. A FÉNY HATÁSA.....	22
1.2.2. A GÁZCSERE (CO ₂) HATÁSA.....	25
1.2.3. A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA	26
1.2.4. A PH HATÁSA	27
2. AZ ALGATERMESZTŐ BERENDEZÉSEK (PBR)	28
2.1. A RENDSZEREK LEGFŐBB TULAJDONSÁGAI.....	28
2.2. A RENDSZEREK TERVEZÉSE	28
2.2.1. A FÉNYVISZONYOK OPTIMALIZÁLÁSA A PBR-EKBEN	30
2.2.2. A GÁZELOSZTÁS OPTIMALIZÁLÁSA A PBR-EKBEN	32
3. ALGATERMESZTŐ PBR-EK SZÁMÍTÓGÉPES MODELLEZÉSE	34
3.1. CFD SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK.....	34
3.1.1. EULERIAN–EULERIAN.....	35
3.1.2. LAGRANGIAN–EULERIAN	36
3.1.3. MIXTURE.....	37
3.1.4. VOF.....	37
3.2. TURBULENCIA MODELLEK	38
3.2.1. K-EPSILON MODELL.....	39
3.2.2. K-OMEGA MODELL	42

3.2.3.	LES MODELL	42
4.	A PBR MODELLEZÉSEK FŐBB CFD ESETTANULMÁNYAI	43
4.1.	A MODELLEZÉSI SZIMULÁCIÓ.....	43
4.2.	A FÉNY SZIMULÁCIÓ	45
4.3.	A GÁZ SZIMULÁCIÓ.....	48
5.	AZ IRODALMI ÁTTEKINTÉS ÖSSZEFOGLALÁSA.....	53
ANYAG ÉS MÓDSZER.....		55
1.	ALGA-TENYÉSZTŐ BERENDEZÉS.....	55
1.1.	ALGA-TENYÉSZTŐKÖR KIÉPÍTÉSE	56
1.2.	ALGA-TENYÉSZTŐKÖR ÁTÉPÍTÉSE.....	57
2.	CFD MODELL	63
2.1.	3D MODELL.....	63
2.2.	HÁLÓZÁS (MASHING)	65
2.3.	FLUENT SOLVER	66
3.	ALGATENYÉSZTÉS ÉS A MÉRÉSEK KIVITELEZÉSE	69
4.	ALGAKONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁS.....	70
4.1.	SZÁRANYAG MEGHATÁROZÁS.....	70
4.2.	HIPERSPEKTRÁLIS MÉRÉS.....	71
4.3.	OPTIKAI ONLINE MÉRÉS	71
5.	ADAT FELDOLGOZÁSI MÓDSZEREK	72
EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK		73
1.	ÁRAMLÁSI VISZONYOK.....	73
2.	HIPERSPEKTRÁLIS MÉRÉSEK ÉRTÉKELÉSE.....	78
3.	AZ ALGAMENNYISÉG FOLYAMATOS MEGHATÁROZÁSÁRA FÉNYÁRAM MÉRÉSEL	86
3.1.	A HUOKREKTOR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2017)	86
3.2.	A HUOKREKTOR ÁTÉPÍTETT VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2018)	92
3.3.	A HUOKREKTOR MINDKÉT VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÖSSZEHASONLÍTÓ ÉRTÉKELÉSE (2017-2018).....	96

4.	ÁRAMLÁSI SEBESSÉG ÉS AZ ALGA LETAPADÁS KAPCSOLATA.....	98
5.	AZ ALGA PRODUKCIÓ IDŐBELI VÁLTOZÁSA.....	99
5.1.	A PBR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2017)	100
5.2.	A MÓDOSÍTOTT PBR-BEN MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2018)	101
	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	105
	ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK).....	107
	ÖSSZEFOGLALÁS	109
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	111
	IRODALOMJEGYZÉK	113
	ÁBRAJEGYZÉK	135
	TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	139
	JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	141
	KIFEJEZÉSEK JEGYZÉKE	143
	FÜGGELÉK.....	151
I.	MELLÉKLET: PBR TÍPUSOK	151
A.	NYITOTT PBR RENDSZEREK (OPEN POUND)	151
B.	TÁBLÁS PBR-EK (PANEL TYPE).....	152
C.	CSÖVES PBR-EK (TUBULAR PBR).....	154
D.	PBR FERMENTORTÍPUSOK (FERMENTERS).....	156
II.	FLUENT SOLVER PARAMÉTEREZÉSE	159
III.	AZ EZREDFORDULÓ ÓTA CFD ALKALMAZÁSÁVAL VIZSGÁLT PBR-EK LISTÁJA.	
	169	
IV.	MINTAVÉTELI IDŐPONTOK	175
A.	A HUOKREAKTOR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL (2017)	175
B.	A HUOKREAKTOR MÓDOSÍTOTT VÁLTOZATÁVAL (2018)	176
V.	A BRISTOL TÁPOLDAT ÖSSZETÉTELE.....	177
VI.	MELLÉKLET HITACHI U-29 UV-VIS SPEKTROFOTOMÉTER	178

KIVONAT

A dolgozat egy **Tubular** rendszerű alga termesztő berendezés továbbfejlesztése során szerzett tapasztalatokat foglalja össze. A fejlesztés előzetes szimulációkon alapszik, ANSYS FLUENT szoftver környezetben. A szimuláció és a kísérleti tapasztalatok alapján újratervezett, átalakított **fotobioreaktorban** (**Photo Bio-Reactor** továbbiakban: **PBR**) új gázbevezetési mód került kialakításra. Ennek segítségével optimális áramlási viszonyokat alakíthattam ki abból a célból, hogy az algasejtek falra történő lerakódását elkerüljük. A **PBR** átalakítása során egy, az optimális algaszüretelést biztosító leeresztő csomópont kifejlesztésére került sor. Továbbfejlesztettem a **PBR** működése során változó algakonzentráció folyamatos mérésére alkalmas optikai mérési módszert is.

ABSTRACT

The paper summarizes the scientific results which have been obtained during development of an algae growing instrument. The development is based on preliminary simulations, made of the ANSYS FLUENT software environment. Using the simulation and the experimental experiences, a new gas injection method was developed to provide optimum flow conditions, for the re-engineered *Photo Bio-Reactor (PBR)*. During the *PBR* modification, a pipe, for facilitating algae harvest, was installed. A new method was born based on optical principle, which is suitable for continuous characterisation of the algal concentration during operation of the photo-bioreactor.

BEVEZETÉS

Korunk kihívása, a természetet végletekig kihasználó emberiség jövőjének biztosítása. Az ipari forradalom során elkezdtek használni a bolygónkon évmilliók alatt keletkezett fosszilis energiahordozókat. Nem kellő súllyal merült fel annak a gondolata, hogy ezek a készletek előbb, vagy utóbb ki fognak merülni, a felhasználásuk során keletkező szennyezések negatív hatása pedig az ökoszisztémára beláthatatlan következménnyel jár majd. Ezt súlyosítja az emberiség aggasztó mértékű túlnépesedése. A közelgő, akár katasztrófát is okozó folyamatok elkerülésére lehetséges megoldásnak kínálkozik az egyszerű szervezetek felhasználása. Mikroalgákat alkalmazhatunk energiatermelésre, vagy a szennyező anyagok semlegesítésére, illetve élelmezési célokra, sőt, akár gyógyszerhatóanyagok, illetve növényvédőszer gyártására, újabban géntechnológia alkalmazásával is.

Jelenlegi technológiák a mikroalgák nem minden célra természetből gazdaságosan (Brownbridge és mtsai. 2014). Távlatilag azonban a mikroalga az egyetlen, olyan lehetséges alapanyaga a biodízelnak, amely megfelel a közlekedési üzemanyagok iránti globális keresletnek, ezáltal teljes mértékben a fosszilis tüzelőanyagok versenytársa lehet (Chisti 2007; Patil, Tran, és Giselrød 2008). Optimális növekedési feltételek mellett, egyes mikroalga fajok a száraztömegük 30-70%-ban szénhidrogénekhez hasonló vegyületeket halmozhatnak fel (Chisti 2007; Hidalgo és mtsai. 2013; Mata, Martins, és Caetano 2010). Olajtartalmuk akár háromszorosa is elérheti a legtöbb szántóföldön termesztett növényben található mennyiségnek (Chisti 2007; Mata, Martins, és Caetano 2010). Ugyanakkor az algasejtekből az olaj eltávolítása, energiaigényes, miután elsősorban a sejtmembrán tartalmazza ezeket a szénhidrogéneket.

A mikroalga élelmiszer forrásként is kiváló alapanyag, az ember számára nagy mennyiségű hasznos vegyületet tartalmaz (Borowitzka 1999). A szépségápolási szereknek és a gyógyszeriparnak is remek alapanyaga. Az eddigi kutatások azt igazolják, hogy az egyes hatóanyagok termelékenységére génmódosítással egyszerűen növelhető (Molina Grima és mtsai. 1999; Olaizola 2003; Pulz és Gross 2004; Ranjbar és mtsai. 2008).

Biofilterként is alkalmazhatjuk a mikroalgát, szennyvíz kezelésére, illetve tisztítására is kiválóan használható (Sawayama, Inoue, és Yokoyama 1994). Indikátor szervezetként, a környezeti változások jelzésére is alkalmasak lehetnek. Az ipari előnyöket összegezve felhasználhatósága kiemelt jelentőségű az újtechnológiában is (Ai és mtsai. 2008; Chaumont 1993).

A mikroalgák termesztése, felhasználásának széleskörűvé válása a második világháborúig nyúlik vissza. A kezdeti német – egyébként sikertelen – algatermesztéssel előállított biodízel kutatásokról (Harder és von Witsch 1942) kevés közlemény maradt fenn. A háborút követő élelmiszerhiányos időszakban, azok pótlására, kiegészítésére előtérbe kerültek az algakutatások (Borowitzka 1999; Ugwu, Aoyagi, és Uchiyama 2008). Ezeknél a vizsgálatoknál az alga termesztését nyitott tavakban (*Open pond*) oldották meg. Az 1950-es évekre a növekvő CO₂ kibocsátás, az algakutatásoknak újabb lendületet adott. Az 1970-es években bekövetkező olajkitermelés csökkenése miatti aggodalom (Barclay és mtsai. 1988) előtérbe helyezte az algából történő olaj kinyerését, de mind a mai napig nem sikerült erre költséghatékony megoldást találni. A mikroalga termesztése során keletkezett biomasszát rendszeresen betakarítják és feldolgozzák. Ígéretes kutatások folynak az algák elpusztítása nélkül, az olajtartalmuk kinyerésére (Vinayak és mtsai. 2015).

A mikroalgák tömegtermelésének sikere (Chisti 2007; Mirón és mtsai. 1999; Molina Grima és mtsai. 1999; Terry és Raymond 1985) nagyban függ a termesztő rendszerek hatékonyságától, a tervezett *PBR* teljesítményétől és az energiamérlegtől (Azaz a kinyert „termék” energiatartalma és a technológiai ráfordítás viszonya).

A *PBR*-ek kialakításukat tekintve, lehetnek nyitott vagy zárt rendszerűek attól függően, hogy a bennük keletkező biomassza közvetlenül érintkezik-e a környezettel vagy sem. A legtöbb ipari alkalmazás, ahol a monokultúra létrehozása fontos szempont, megköveteli a zárt rendszer alkalmazását. A mikroalgák termelékenységének növeléséhez gyakorlatilag, bármilyen, felül nyitott tó, csatorna, áttetsző anyagból készült tartály, csőrendszer alkalmas lehet, ahol biztosítható a megfelelő fény, tápanyagforrás és hőmérséklet.

A zárt rendszerű *PBR*-ek sem tekinthetők teljesen zárt rendszereknek, mert kimenő és bemenő anyagáramokkal is rendelkeznek. Ezekkel az anyagáramokkal biztosítható az algák tápanyag utánpótlása és a termelődött biomassza elvezetése is. Mindezek a környezettel való kapcsolódási pontok potenciális szennyező források a rendszerre nézve, ezért fontos szempont a megfelelő sterilitás biztosítása. Az üzemeltetés szempontjából, egy reaktor lehet szakaszos vagy folyamatos. A szakaszos üzem alatt egy algatelep betelepítését, majd a növekedési életciklus után a leszüretelést értjük. A szüretelést követően a következő termesztés hatékonysága érdekében célszerű egy tisztítási ciklus beiktatása is. Folyamatos üzem esetén, az algaállomány szinten tartásáról beszélhetünk, ahol a szüretelés folyamatosnak tekinthető, tisztítás pedig csak durva szennyeződések, lerakódások miatt szükséges, eseti

jelleggel. Ugyanakkor az ilyen lerakódások jelentősen csökkenthetik a **PBR** hatékonyságát és teljesítményét. Ezért minden olyan megoldás, amely az algasejtek falra történő lerakódását megakadályozza, kimutatható hatások és teljesítménynövekedést jelent. Különösen akkor, hogyha a lerakódás megakadályozását áramlási megoldással, és nem segédanyagokkal mérsékeljük, illetve kerüljük el.

A **PBR**-ek robbanásszerű fejlődését eredményezte az 1970-években az olajipar hatására fejlődésnek indult folyadék dinamikai elemző (*Computational Fluid Dynamics* azaz **CFD**) szoftverek megjelenése, és az azóta is töretlen fejlődése.

Korunk **CFD** szimulációs eszköztárának, már nélkülözhetetlen, elemei:

- 3D modellalkotása.
- Minden igényt geometria, valamint numerikus számolási algoritmus igényét is kielégítő hálózás (Mesher).
- A legkülönbözőbb turbulencia modelleket tartalmazó, messzemenőkig programozható, megoldó, kiértékelő szoftverek.

A szuperszámítógépek kiterjedt számítási teljesítménye és a végletekig testreszabható szimulációs szoftverek ellenére, a legtöbb kísérleti reaktorból nem lesz a gyakorlatban tömeggyártásra alkalmas természetrendszer.

A sikertelenségnek számos oka lehet:

- Méretkülönbség a kísérleti reaktor és a valós termelő rendszer között, azaz Scale Up (Ugwu, Aoyagi, és Uchiyama 2008),
 - geometriai (Mouza, Kazakis, és Paras 2004; Wild és mtsai. 2003),
 - áramlási viszonyok változásával összefüggő.
- Az alga fény és tápanyag ellátásában bekövetkezett zavarok (például algasejtek lerakódása a **PBR** falára).

Mindezek az áramlásban nem kívánt eltéréseket okozhatnak: anyagfelhalmozódásokat és sejtroncsolódásokat.

A tudomány folyamatosan foglalkozik a modellezési problémákkal, amelyek megoldására mára már számtalan megoldást dolgoztak ki.

CÉLKITŰZÉSEK

Az kísérleteim elsődleges célja, hogy a *Biológiai Rendszerek és Élelmiszeripari Műszaki* Tanszéken kifejlesztett hurokreaktorban megteremtsem az alga termesztéshez szükséges ideális áramlási viszonyokat. Ennek elérése érdekében elsajátítottam az ANSYS FLUENT szimulációs rendszer működését. A megnevezett program felhasználásával kívánom modellezni a változtatást igénylő **PBR** áramlási viszonyait. Ennek eredményeként teszek további kísérletet az áramlást meghatározó gázbevitel hatékonyságának optimalizálásra. Céloom még az algaszeparálás megkönnyítése az áramlási viszonyok megváltoztatásával. Kutatásom eredményességéhez elkerülhetetlenül hozzátartozik az optikai vizsgálatok módszerének továbbfejlesztése is.

IRODALMI ÁTTEKINTÉS

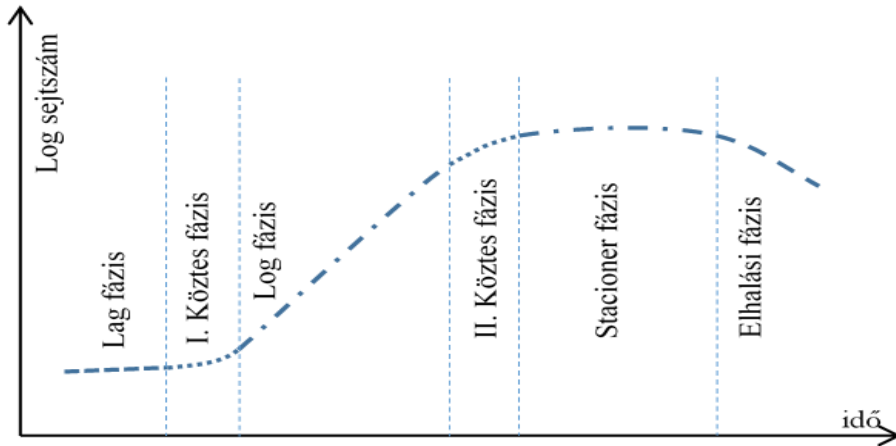
1. A MIKROALGÁKRÓL ÁLTALÁBAN

1.1. ALGA, MINT ÉLŐ SZERVEZET

Az eddigi kutatásokból tudhatjuk, hogy az alkalmazott algológia a *mikroalga* fogalom alatt a mikroszkópikus méretű eukarióta algák különböző divízióit, valamint az oxigéntermelő, fotoszintetikus prokarióta baktériumokat (cianobaktériumokat) kell érteni (Tomaselli 2004). A mikroalgák többnyire vízben élnek, de megtalálhatók a különböző talajtípusokban azok felszínén. (Ördög 2014). Ezekben a mikroszervezetekben a szervezetek különböző értékes anyagok forrásai: pigmentek, telítetlen zsírsavak, vitaminok, élelmiszer adalékok stb. (Cardozo és mtsai. 2007) lehetnek. Az algáknak, mint minden élő szervezetnek, alap építő elemei a fehérjék, lipidek és a szénhidrátok (Grobbelaar 2004). A gyakorlati felhasználás szempontjából kulcskérdés a megfelelő törzs kiválasztása, mivel ezek az alkotórészek az egyes algafajokban, más-más arányban vannak jelen. A mikroalgák (zöldalgák, kék-zöldalgák) autotróf élőlények, növekedésükhöz, szaporodásukhoz szükségtelen szerves szubsztrátok felvétele a környezetből. Fényenergia (napfény) felhasználásával, CO₂ és szerves sók felvételével képesek előállítani a saját szerves molekuláikat (Carlsson és mtsai. 2007). A mikroalgák gyors szaporodásra és növekedésre képes mikroorganizmusok. A fényenergiát, a szárazföldi növényekhez viszonyítva nagyobb határfokkal hasznosítják (Carlsson és mtsai. 2007; Sheehan és mtsai. 1998).

1.2. MIKROALGA NÖVEKEDÉS OPTIMÁLIS TÉNYEZŐI

Az algák növekedési ciklusának vizsgálatokor a kutatásban résztvevők a következő eredményre jutottak. Amennyiben az algák természetesen, az eltelt idő függvényében logaritmikusan ábrázolták a sejtszámot (vagy a szuszpenzió koncentrációját) a szaporodási görbét kapták (Hodai 2014). A szaporodási görbe segítségével lehet jellemezni egy adott természeti időszakot, ill. algafajt, valamint optimalizálni a **PBR**-ek működését, hogy olyan koncentráció értékek között működhessen, ahol a legintenzívebb a szaporodás. Az **1. ábrán** egy általános szaporodási görbe látható.



1. ábra Általános szaporodási görbe

Át szerkesztve forrásból: (Hodai 2014)

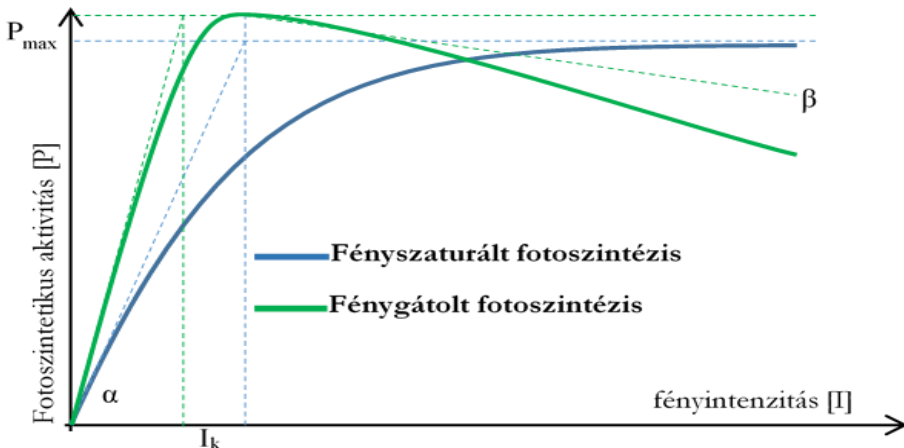
Az általános szaporodási görbe fázisai:

- *Lag fázis*: a sejtszám az első néhány órában nem változik, az új környezet kiváltotta sokk (pl. az alga sejteket egyik tápoldatból egy másikba oltják át) hatásra (ekkor adaptálódnak az organizmusok környezetükhöz),
- *I. köztes fázis*: az adaptálódott sejtek hirtelen szaporodásnak indulnak,
- *Log fázis*: a sejtszám megtöbbszöröződik, a növekedés exponenciálissá válik.
- *II. köztes fázis*: a sejtszámok növekedése csökken, az elfogyó tápanyagforrás vagy az anyagcsere során termelődő toxikus anyagok miatt,
- *Stationer fázis*: a sejt szaporodás és elhalás egyensúlyban van,
- *Elhalási fázis*: a biomassza energia tartalékai elfogynak és a sejtek elhalnak.

1.2.1. A FÉNY HATÁSA

Mivel a mikroalgák a fény energiáját használják élettevékenységük fenntartására, ezért a fény kulcs paraméter, egyik legfontosabb meghatározó tényezője az alga növekedésnek (Kirk 1994; S. Oncel és Sukan 2008; A. Richmond és mtsai. 1990; S. S. Oncel és Akpolat 2006; Hodai 2014). A fényintenzitás igénye függ a sejt sűrűségétől, magasabb sejtsűrűség esetén nő (Fan és mtsai. 2007). Nagyon alacsony fényintenzitás mellett az alga kultúra növekedése és szaporodása megáll, ezt az állapotot a szakma „kompenzációs pont”-nak nevezi (Goldman 1979). A fényintenzitás növelésével a fotoszintetikus aktivitás is növekszik egészen a szaturációs pontig, azaz a maximális növekedési sebesség eléréséig. Az intenzitás további

növelése káros fotooxidációs folyamatokat indít el (Grobelaar, Nedbal, és Tichý 1996; Yanqun Li és mtsai. 2008). Ez esetben sérülnek az algák fény-receptorai, csökken a fotoszintézis sebessége és a szaporodási sebesség is, ez a fotoinhibíció tartománya (Boston és Hill 1991). A fotoszintézis és fényintenzitás viszonyát az úgynevezett P-I (Photosynthesis - Irradiance) görbék szemléltetik a legjobban (2. ábra).



2. ábra P-I görbe jellemző adatai

Ábrakeresztve forrásból: (Hodai 2014)

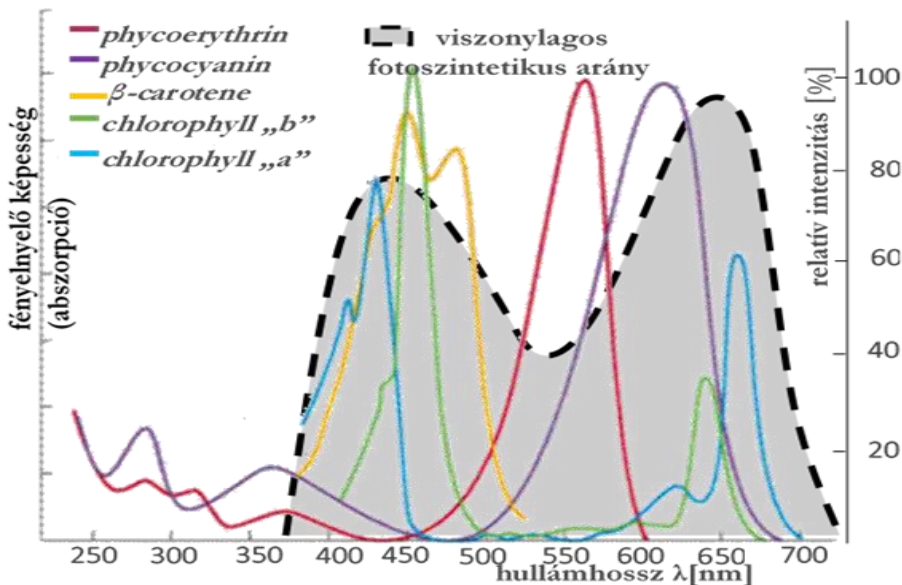
A legtöbb alga a teljes napsugárzás 20%-nál már eléri a szaturációs pontot (Mandalam és Palsson 1998), így a folyadék fényforráshoz közelebb eső határfelületének közelében lévő algák az inhibíciós tartományba kerülnek, míg a mélyen lévő sejtek nem kapnak elég fényt, ez korlátozza a szaporodásukat (Doods 1989; Janssen és mtsai. 2003; Pinckney és Zingmark 1993; Pulz O. 2001; Rubio és mtsai. 2003; S. S. Oncel és Akpolat 2006; Yun és Park 2003). Ezért előnyös nem túl nagy sűrűségű alga-szuszpenzió vékony rétegben történő termesztése megfelelő intenzitású keverés mellett. Az alkalmazott fény intenzitása a szaporodási sebesség mellett a lipidek felhalmozását is befolyásolja (Dassey és Theegala 2013; J. Lee és mtsai. 2013).

A fotoinhibíciós folyamatok időfüggőek, fény stressz bekövetkezése után néhány perccel visszafordíthatatlan pusztulás következik be, mert a mértéke 10-20 percen belül meghaladhatja az 50%-ot (Molina és mtsai. 2001; Pulz O. 2001). A fotoinhibíció megszüntetése, vagy a magasabb fényintenzitásra történő áttérés a biomasszában növeli az alga napi átlagos növekedési ütemét. További megoldatlan probléma a fotorespiráció

elkerülése, amely csökkenti a fotoszintézis hatékonyságát (Pulz O. 2001). Fotorespiráció általában akkor lép fel, ha a szén-dioxidhoz képest magas az oxigén koncentráció.

Az algatermesztő berendezések megvilágítása legegyszerűbben a napfényvel lehetséges. Hátránya viszont, hogy a természetes fényt nem lehet kontrolálni, alkalmazásának hatékonysága, nagyban függ a földrajzi helyzettől (az egyenlítőtől távolodva, a fény intenzitása és a napfényes órák száma csökken) és az időjárási viszonyoktól. Természetes fény hasznosítására a legtöbb **PBR** (*Open pound, Flat plate*, és a ferde *Tubular* stb.) alkalmazható (Chisti 2007). A **PBR**-ek kapacitásának növelésére (akár 50-100 literrel) számos kísérlet történt, de ezeknek a kiegészítőknél (tartályok, függesztett műanyag tasak) jellemzően nagyobb a fénytől elzárt holt zóna mérete, amit már jól megtervezett turbulens áramlási viszonyokkal sem lehet kompenzálni. Ebben a formában sikeres biomassza-termesztés nem lehetséges (Pulz O. 2001).

A laboratóriumi méretű **PBR**-nél általában (belsőleg is és külsőleg is) mesterséges megvilágítást alkalmaznak. A megfelelő fényforrás kiválasztásánál figyelembe kell venni az adott algafaj fotoszintetikus aktivitását (**PAR**), ami jellemzően a 400-700 nm hullámhosszú fény felhasználásával történik (3. ábra) (Fernandes és mtsai. 2010; Griffiths és mtsai. 2011).



3. ábra Fényhasznosító molekulák abszorpciós görbéje, és az összegükből származtatható viszonylagos fotoszintetikus aktivitás aránya

Forrás: (Danila és Lucache 2016)

Összehasonlításokat végeztek a mesterséges fényforrásokkal, beleértve a hűvös fénycsövet, izzókat, halogén lámpákat, AlInGaP II (alumínium-foszfid indium gallium csúcs hullámhossza 643 nm) és más fényt kibocsátó diódákat (LED-ek) (A. Kommareddy és Anderson 2003). Úgy találták, hogy az AlInGaP II LED-ek a leghatékonyabb és leggazdaságosabb fényforrások. Az általuk kibocsátott fény több mint 98%-a 600 és 700 nm között van.

1.2.2. A GÁZCSERE (CO₂) HATÁSA

Az algáknak a fotoszintézishez szükségük van gázcserére. A fotoszintetikusan aktív időszakokban CO₂ gázt vesznek fel és O₂ gázt adnak le. A **PBR**-be beáramoltatott gáz, nemcsak táplálja az algát, hanem a sejt körül felhalmozódott toxikus anyagokat is magával viszi. A **PBR**-be juttatott CO₂ gáz vízben oldódik (0,145 g/100 ml) és táplálja az algát (Mirón és mtsai. 1999). Bár a levegő tartalmaz széndioxidot (404 ppm), de ez a mennyiség a hatékony alga (45 - 50 wt%-a szén) termeléséhez kevés (Hodai 2014). Füstgázok, valamint CO₂-dal dúsított levegő beáramoltatásakor figyelemmel kell lenni a nagy CO₂ veszteségre (Dassey és Theegala 2013).

Nyitott rendszerekben körülbelül 20%, míg zárt **PBR**-ben, fermentorokban akár 40 - 50% is lehet a CO₂ hasznosulása. Zárt rendszerekben problémaként merül fel a fotoszintetikus aktivitás következtében keletkező, majd feldúsuló O₂, ami károsíthatja a sejteket (Zhao és mtsai. 2011).

Az algák a széndioxidon kívül más üvegházhatású gázokat így nitrogén-dioxidot (NO₂) is hasznosítanak. Számos tanulmány foglalkozik a füstgáz komponensek toxicitásával, de ez a terület még nem megfelelően dokumentált. Egyes tanulmányok szerint, a mikroalgák termelékenységének a növekedését a füstgáz SO_x, NO_x tartalma és a tiszta CO₂ alig befolyásolta (Bitog és mtsai. 2011). Más tanulmányokban a CO₂ koncentráció fotoszintézisre gyakorolt hatását tanulmányozták (Tsuzuki és mtsai. 1989), ahol a növekedéshez szükséges CO₂ mennyisége a mikroalga fajok és a **PBR** típusok függvényében változik. A kutatók a mikroalgák CO₂ tűrőképességét vizsgálva arra jutottak, hogy egyes fajok képesek a nagyon magas koncentrációt hasznosítani, de általában alacsonyabb koncentráció is elégséges a maximális növekedésükhöz (**1 táblázat**).

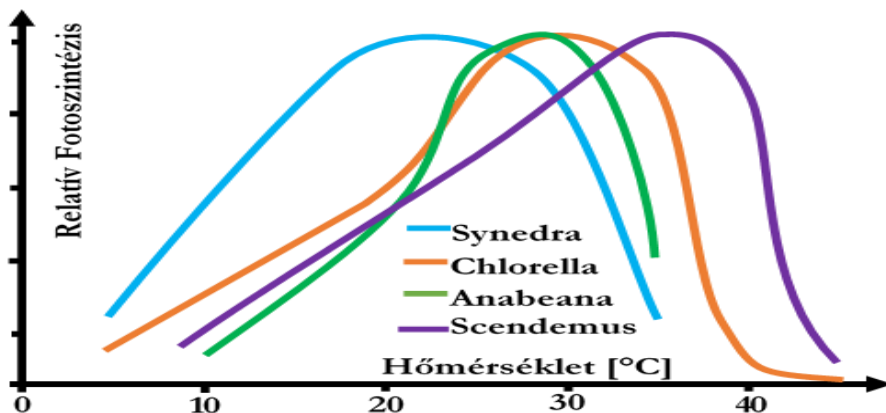
1. táblázat A CO₂ optimális, maximális felvevőképessége különböző mikroalga fajoknál

Faj	Maximális CO ₂ koncentráció (még tolerálható)	Optimális CO ₂ koncentráció	Forrás
<i>Cyandrtum caldartum</i>	100%		(Seckbach, Gross, és Nathan 1971)
<i>Scenedesmus sp.</i>	80%	10-20%	(Hanagata és mtsai. 1992)
<i>Chlorococcum Littorale</i>	60%		(Kodama, Ikemoto, és Miyachi 1993)
<i>Synechococcus elongatus</i>	60%		(Miyairi 1995)
<i>Euglena gractlis</i>	45%		(Nakano és mtsai. 1996)
<i>Chlorella sp.</i>	40%	10%	(Hanagata és mtsai. 1992)
<i>Eudorina sp.</i>	20%		(Hanagata és mtsai. 1992)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15%		(Nagase és mtsai. 1998)
<i>Nannochloris sp.</i>	15%		(Yoshihara és mtsai. 1996)
<i>Chlamydomonas sp.</i>	15%		(Miura és mtsai. 1993)
<i>Tetraselmis sp.</i>	14%		(Matsumoto és mtsai. 1996)

Forrás: (Ono és Cuello 2003)

1.2.3. A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA

Az algák növekedési sebességét a hőmérséklet emelkedése csak egy bizonyos értékig növeli exponenciálisan (4. ábra). A különböző alga fajoknál az optimális hőmérséklet eltérő lehet (Singh és Singh 2015; Wetzl 2001).



4. ábra Alganövekedés különböző hőmérsékletek mellett

Forrás: (Wetzl 2001)

Míg a zárt rendszerekben a hőmérséklet szabályozható, addig a szélsőséges hőmérséklet-ingadozás a szabadban lévő kultúrák esetében nehézséget okoz. Az alacsonyabb hőmérséklettartományban ($\sim -20^{\circ}\text{C}$) általában lelassul a növekedés, nem pusztulnak el az algák, az optimális hőmérséklet tartomány ($\sim 18\text{--}25^{\circ}\text{C}$), fölötti értékek élettanilag veszélyesek. A 35°C -nál nagyobb hőmérséklet halálos a fajok többségénél (Hanagata és mtsai. 1992; Mehlitz 2009; Serra-Maia és mtsai. 2016). Termelékenység szempontjából a fényhiányos fázisban előnyös az alacsonyabb hőmérséklet ($\sim -20^{\circ}\text{C}$), mert kisebb lesz a biomassza-vesztés (A. R. Kommareddy és Anderson 2005; Castrillo és mtsai. 2013; Ördög és mtsai. 2016; Vandamme és mtsai. 2012). A hőmérséklet hatása a légzésre és a fotorespirációra erősebb, mint a fotoszintézisre. Abban az esetben, ha a CO_2 vagy a fény korlátozó tényező, a hőmérséklet hatása a fotoszintézisnél jelentéktelen lehet (Pulz O. 2001; A. Richmond és mtsai. 1990).

1.2.4. A PH HATÁSA

A mikroalgák növekedési ütemétől függően az optimális pH érték eltérő lehet, a legtöbb esetben a semlegeshez közeli tartományban ($\text{pH} \sim 6\text{--}8$) mozog (A. R. Kommareddy és Anderson 2005). A pH toleráns fajokkal végzett kísérletek bizonyítják, hogy a pH csökkentésekor, ($\text{pH} \sim 5,0\text{--}6,5$) az algák aktivitása nő (Leavitt és mtsai. 1999), fordított esetben ($\text{pH} = 9,5$) az aktivitásuk csökken (Pedersen és Hansen 2003). A természetes közeg pH értéke függ (Amos Richmond 2004) a $\text{CO}_2\text{-HCO}_3$ puffer rendszer kapacitásától és az algák által felhasznált nitrogénforrás formájától (ammónium formája esetén a pH csökken, nitrát esetében a pH növekszik). Magas pH-szintnél, a CO_2 hozzáférhetősége csökken, ami a mikroalgák növekedésének és a fotoszintézisének korlátozóává válhat (Chen és Durbin 1994; Kong és mtsai. 2007). Bár a magasabb CO_2 koncentráció vezethet nagyobb biomassza termelékenységhez, de az általa előidézett alacsony pH hatását a mikroalgák fiziológiájára és a megnövekedett szennyeződés mértékére sem szabad figyelmen kívül hagyni (Chen és Durbin 1994).

2. AZ ALGATERMESZTŐ BERENDEZÉSEK (PBR)

2.1. A RENDSZEREK LEGFŐBB TULAJDONSÁGAI

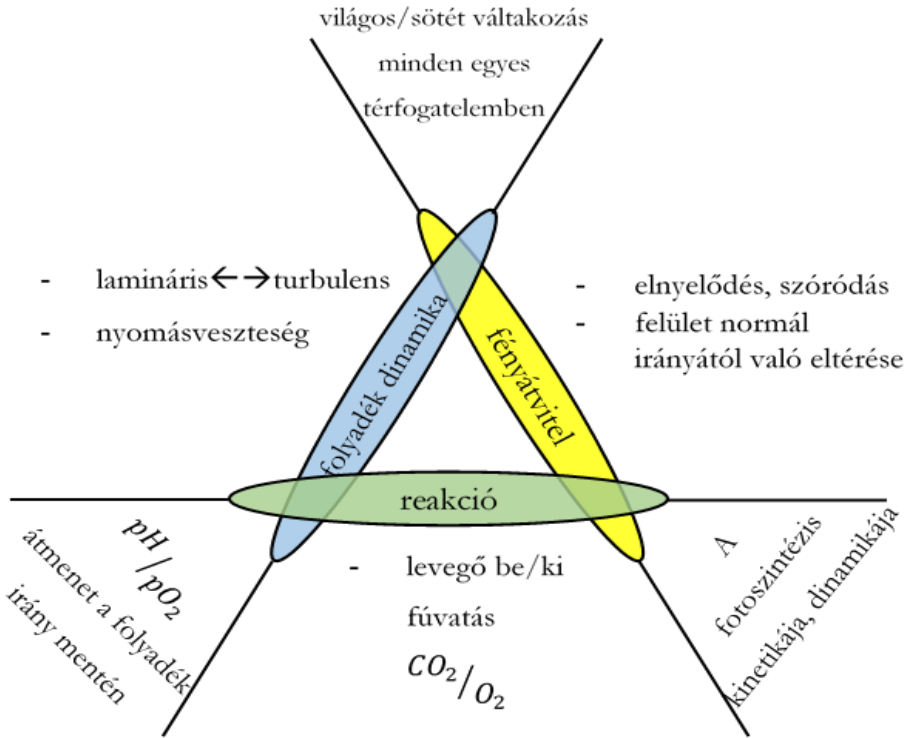
Az algatenyésztő berendezések két fő csoportba sorolhatók, nyílt (**I.a, melléklet**) és zárt rendszerű (**I.b, c, d, melléklet**) **PBR**-ekre. Nyílt rendszer esetén, nem beszélhetünk monokultúráról, de a rendszer éppen ezért stabilabb (Bitog és mtsai. 2011). A zárt rendszerű **PBR**-ek elsősorban lehetővé teszik az algák jó immobilizálását és megfelelő fény kietettségét, valamint könnyen temperálhatók és egyszerűen tisztíthatók (Ugwu, Aoyagi, és Uchiyama 2008).

A korszerű zárt rendszerű **PBR**-ek, nemcsak tapasztalati eredmények alapján készülnek (Borowitzka 1999), hanem a célzott műszaki fejlesztési folyamatok eredményeként. Néhány említett pont, mint például a magas költségek még mindig kritikus kérdésnek számítanak. Több összefoglaló cikkben (Y.-K. Lee 2001; Mírón és mtsai. 1999; Molina Grima és mtsai. 1999; Suh és Lee 2003) olvashatunk egy újabb racionális **PBR**-ek tervezés módszertan kezdetéről. Megfontolás tárgyává tették alapvető folyamatok – a fényeloszlás, anyagszállítás és hidrodinamika – kidolgozását (Janssen és mtsai. 2003). A kísérleti **PBR**-ek eltérő geometriája és működése mindig függ a helyi viszonyoktól, az előállítandó terméktől, és a gazdasági korlátoktól. A kereskedelemben kapható zárt **PBR**-ek viszont még mindig nem jelentenek optimális megoldást.

Csak kevés algatermelő üzem létezik zárt **PBR**-rel, ami megnehezíti a közvetlen értékelést.

2.2. A RENDSZEREK TERVEZÉSE

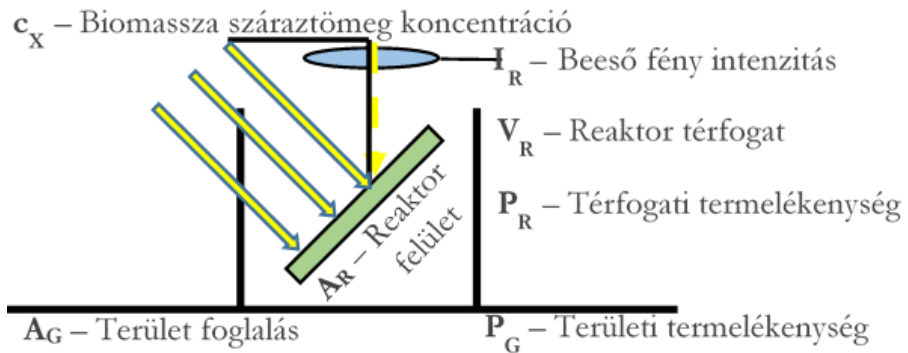
A **PBR**-ek tervezése megköveteli a környezeti paraméterek, és a biológiai válasz közötti kölcsönhatás megértését. A **PBR** egy tipikus háromfázisú rendszer, ahol a folyadék fázis (a tápoldat), a szilárd fázis (az algasejtek) és a gázfázis egyszerre van jelen. A szakirodalom olykor negyedik fázisnak nevezi a fényt, mint sugárzási teret (Posten 2009). A **PBR** tervezése során a folyadék dinamikája, a biokémiai reakció, a fényátvitel és a fázisok speciális jellemzői, valamint kölcsönhatásaik mutatnak rá a működés főbb problémáira, lásd (**5. ábra**).



5. ábra A tervezés és az élettani hatások kapcsolata

Forrás: (Perner, Posten, és Broneske 2003)

A különböző tervezésű **PBR**-ek összehasonlításakor a méréseket eltérő termelési célú **PBR**-ekkel és változó vizsgálati módszerekkel végezték (Posten 2009). A 6. ábra példa a tervezés számára fontos paramétereikről.

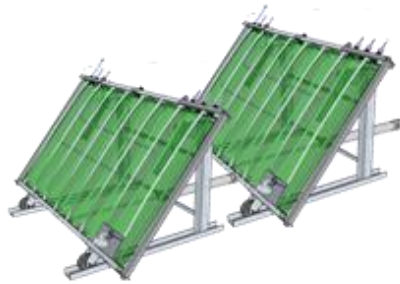


6. ábra PBR tervezési paraméterek

Forrás: (Posten 2009)

2.2.1. A FÉNYVISZONYOK OPTIMALIZÁLÁSA A PBR-EKBEN

Az algakultúrában fellelhető fényáram nélkülözhetetlen a **PBR** működése szempontjából (Pruvost, Pottier, és Legrand 2006). A mikroalgák többsége alacsony fényintenzitáshoz alkalmazkodik, a teljes fény spektrum töredékét (a mérsékelt övi régiókban egy nyári nap déli napfényintenzitásának 10%-át) hasznosítja (Rosello Sastre és mtsai. 2007). A jelenség gyakorlati alkalmazására egy lehetséges mérnöki válasz a függőlegesen szerelt nagy felületű, lapos vagy méhsejt szerkezetű **PBR** panelek telepítése (Tredici és mtsai. 2016) (7. ábra).



7. ábra a függőleges panel („Green Wall Panel” GWP) és annak dönthető változata

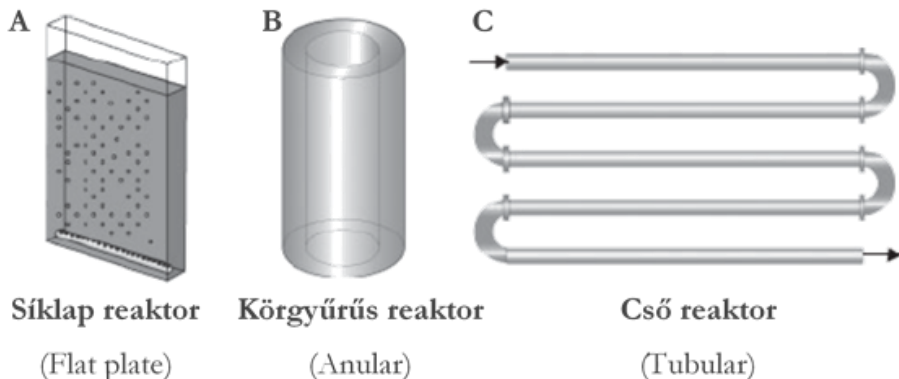
Forrás: (Tredici és mtsai. 2016)

Ennek a kialakításnak köszönhetően az algaállományt csökkentett intenzitású napsugárzás éri így a 2. ábrán már bemutatott fényzaturált állapot elkerülhető.

Abban az esetben, ha specifikus algatermékeket kell létrehozni előállításukhoz szükséges lehet fotó-aklimatizációs körülmény vagy erős fény. Ennek elérése érdekében egyes kutatók (Grobbelaar és Kurano 2003; Suh, Joo, és Lee 2006) a maximális fényteltettség elérésére nem az általánosan alkalmazott beeső fényre merőleges kialakítást használják, hanem létrehoznak magas és alacsony fényviszonyal rendelkező részeket.

A fény intenzitásának térbeli eloszlását a reaktoron belül, eltekintve a geometriától, döntően az alga sejtek kölcsönös árnyékolása, a pigmentek fényelnyelési, valamint fény szórás képessége okozza (Grima és mtsai. 1994). Többen foglalkoztak, a részecskéket is tartalmazó folyékony rendszerek fénytörésének fizikai meghatározásával, mindezek azonban alapvetően csak közelítések, mert az apró, lapos térfogatelemek exponenciális növekedése, függ a biomassa koncentrációtól (Cornet és mtsai. 1995). Magasabb koncentrációt gyorsabban lehet elérni kisebb sötét térfogathányaddal. A nagy sejtsűrűség eléréséhez, a **PBR** keresztmetszet

vastagságának a lehető legkisebbnek kell lennie (Amos Richmond, Cheng-Wu, és Zarmi 2003). Megállapították, hogy tervezési szempont fontos a „nagy felület – térfogat” arány (high surface volume ratio SVR) (Pulz és Gross 2004). Erre példa a **8. ábrán** szemléltetett reaktorkialakítások, illetve ezek kombinációja is lehet.



8. ábra A leggyakoribb zárt PBR geometriák; A) Síklap reaktor, B) buborék oszlop, itt gyűrűs reaktor, C) cső reaktor; Más geometriák összeállíthatók ezen alapgeometriákból.

Forrás: (Posten 2009)

A **PBR**-ek kiterjesztésének egyik legfontosabb kulcsa a *fény behatolásának* (penetráció) útja a szuszpenzióba. Ennek hatékony alkalmazására fejlesztették ki a buborékoltató és légkeveréses oszlop **PBR**-eket (Joshi 2001). A fény útjának hossza egyik esetben sem haladhatja meg a 0,2 m-t mert akkor már a **PBR** belsejében holtzóna alakulna ki (Mirón és mtsai. 1999).

Az algasejtekre jutó *fényintenzitást* a szuszpenzió keveredés is jelentős mértékben befolyásolja. (Grobbeelaar, Nedbal, és Tichý 1996) A **PBR**-ben turbulencia változtatásával befolyásolható az algasejtek sötét és világos- zónában tartózkodása. Az 1 Hz-nél alacsonyabb fényingadozási frekvenciát kerülni kell, mert különösen nagyméretű reaktorok esetében jelentős hozamcsökkenést okozhat (Janssen és mtsai. 2001; Molina és mtsai. 2001). Az 1 kHz vagy annál nagyobb frekvencia esetében a fény energia eltárolódik, így a fénymentes időszakokban nem állnak le az anyagcsere (metabolikus) folyamatok Ez a jelenség a „Flashing light effect” (Zou és Richmond 2000), hátránya azonban, hogy a gyors keverés okozta fényátmenet csak nagy súrlódási veszteségekkel valósítható meg, ami a nagyobb

rendszerekben már gazdaságtalan. Ennek a jelenségnek okán a kísérletek 1 Hz és 1 kHz frekvencia közötti átmeneti tartományban folynak. (Yoshimoto, Sato, és Kondo 2005).

Az optimális **PBR** tervezéshez elengedhetetlen a **CFD** alkalmazása. Egy tubular **PBR**-ben az algaszuszpenzió részecskepályáit frekvencia analízissel vizsgálva kimutatták, hogy sugárirányú fényintenzitással, az azonos irányú keveredéssel számolva megelőzhető a világos/sötét fényciklusok váltakozásának túlzott mértékű lassulása. Egy tubular **PBR**-ben végzett (részecskepályáinak) frekvencia analízis számítással kimutatták, hogy megelőzhető a világos/sötét fényciklusok váltakozásának túlzott mértékű lassulása az algaszuszpenzióban, ha a sugárirányú fényintenzitás az azonos irányú keveredéssel párosul. (Perner-Nochta és Posten 2007).

2.2.2. A GÁZELOSZTÁS OPTIMALIZÁLÁSA A **PBR**-EK BEN

A megfelelő fényellátottságon túl a **PBR** ek- legfontosabb feladata, a fotoszintézishez szükséges gázcseré (CO₂ ⇌ O₂) biztosítása. A kultúra szén-dioxid igényét a biomassza széntartalmából **sztöchiometria**-i alapon lehet számítani. A levegő CO₂ tartalma 404 ppm, ezt kell az alga igényének – ami hozzávetőleg 1,85g CO₂/g, vagy magasabb – megfelelő értékre dústani. A mikroalga gázanyag cseréjéhez a szén-dioxid felvétel kinetikájából következően szükséges még 0,1-0,2 kPa túlnyomás is. Mivel a sejtek gáz anyagcseréje függ a fénytől, a lehetséges dúsulások is a megvilágított szakaszban fordulhatnak elő. Ez általában nem jelent problémát, mivel jó a keveredés a folyadékáramlás fő irányában. Ha a gázáram bemeneti és kimeneti pontjai között mégis komolyabb O₂ vagy CO₂ felhalmozódás tapasztalható (különösen a tubular **PBR**-nél), az jelentős pH változással is jár. A legtöbb aggodalomra az oxigén alacsony oldhatósága adhat okot. Egy esetlegesen gátló koncentráció (néhány algánál >120% másoknál >200% levegő telítettség), is előfordulhat a csőben gázcseré nélkül már 1 perc után. (Doucha, Straka, és Lívanský 2005).

Több kutatás is bizonyítja, hogy a **PBR**-ben történő mikroalga termelésénél a beáramló szén-dioxid gáz térfogat arány optimális értéke 5% vagy 10% (D. Zhang, Dechatiwongse, és Hellgardt 2015). A sík **PBR**-ekben, a javasolt levegőztetés sebessége 0,05 m/min elegendő ahhoz, hogy javítsa a keverést és az anyagszállítást (Sierra és mtsai. 2008). Annak ellenére, hogy a levegőztetés nagyobb algaszaporulatot eredményez túlzott mértéke magasabb üzemeltetési költségekkel jár, ezért nagyüzemi mikroalga termelés esetén nem ajánlott (K. Zhang, Kurano, és Miyachi 2002).

A buborékoltató és légkeveréses oszlop **PBR**-ekben a **diszperz** áramlás maga is elősegíti a gázok keveredését. Ezt az áramlási jelenséget az axiális diszperziós együttható, keverési idő, keringési idő és a Bodenstein szám együttesen jellemezi (Miron és mtsai. 2004). A buborékoszlop **PBR**-ek esetén, rövidebb keverési időre van szükség, a termelékenység szempontjából a légkeveréses rendszerek mégis hatékonyabbak (Degen és mtsai. 2001; Fan és mtsai. 2007; S. Oncel és Sukan 2008; Ranjbar és mtsai. 2008). A hatékonyságot az anyagáramlás fokozása is növeli, mert így elkerülhető a sejtek letapadása, és az esetleges dugulás kialakulása (Contreras és mtsai. 1998). Korlátozni kell a bemeneti – átbuborékoltatás vagy szivattyúzás általi –mechanikai energia mértékét, mert a sejtek károsodhatnak vagy fokozott stresszes állapotba kerülhetnek, másrészt megnő az energiafelhasználás, aminek csökkentése fontos kérdés a gyártási költségekben (Gudin és Chaumont 1991; Panda és mtsai. 1989; Thomas és Gibson 1990).

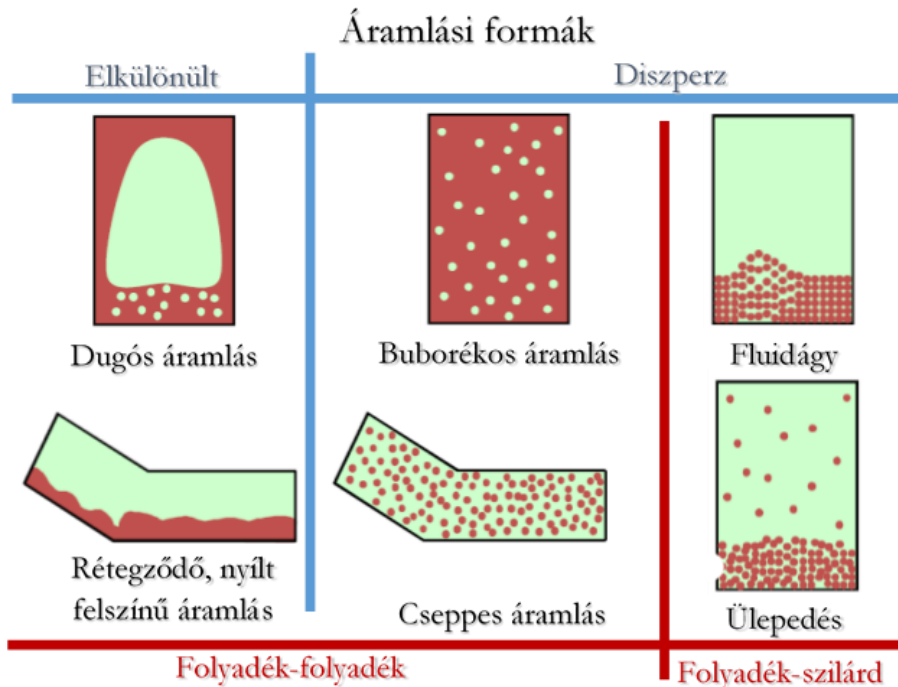
3. ALGATERMESZTŐ PBR-EK SZÁMÍTÓGÉPES MODELLEZÉSE

A **PBR**-ek 3 fázisú (folyadék, gáz és szilárd) rendszerek, ezért modellezésük rendkívül komplex, nagy számításigényű feladat. A szimulációhoz szükséges hardverek, szoftverek és matematikai elméletek az ezredfordulóra értek el arra a szintre, hogy bonyolultabb szimulációkra legyenek képesek (Grace és Taghipour 2004; Hutmacher és Singh 2008; Leib, Pereira, és Villadsen 2001). Számos modell közül, amit használnak a **PBR**-ek és más többfázisú áramlási rendszerek hidrodinamikai és kapcsolódó tulajdonságainak előre jelzésére, a **CFD** hatékonyan alkalmazható eszköz. A **CFD** használatával a **PBR** reprezentatív számítási modelljét (a többi rendszerhez, vagy eszközhöz hasonlóan) fel lehet építeni. A jó szimuláció készítéséhez behatóan kell tanulmányozni a **PBR**-ben zajló folyamatokat. A **CFD** technika számszerűen megoldja a Navier-Stokes egyenleteket a számítási tartomány egyes celláiban meghatározható a folyadékdinamika és a kapcsolódó fizikai jelenségek (például a felszíni gáz sebessége, a gáztartalom, a buborékátmérő, az oszlop geometriája, a habzástápláló és a nyomás) előrejelzése.

A közelmúltban megjelent publikációk rámutatnak arra, hogy a **CFD**-vel létrehozott szimulációkkal a buborékoszlopok hidrodinamikája becsülhető. Ennek köszönhetően a **CFD**-nek a **PBR** tervezésére való alkalmazása egyre népszerűbb (A. Kommareddy és Anderson 2004), mivel a számítógépek a jövőben képesek lesznek a számítási idő lerövidítésére és a legkomplikáltabb geometriák kezelésére is.

3.1. CFD SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK

A többfázisú szimulációs módszerek közül a **PBR** működésének hidrodinamikai vizsgálataihoz a **CFD** eszközkészletében rendelkezésre álló *Eulerian-Eulerian*, *Lagrangian-Eulerian*, kevert (*Mixture*) és a folyadék térfogat (*Volume Of Fluid, VOF*) többfázisú modellek használata a legnépszerűbb. Több egyidejű kémiai reakció modellezhető, egy térfogaton és/vagy felületen, falon, porózus felületen. A **PBR**-ek olyan több fázisú rendszerként írhatóak le, amelyben egyszerre jelen lehetnek olyan többkomponensű (több alfafaj egyidejű jelenléte /multispecies) áramlások, amelyek molekuláris szinten keverednek egymással és leírásukkor azonos sebességet, hőmérsékletet alkalmaznak (9. ábra).



9. ábra Többkomponensű (multispecies) áramlások lehetséges formái

Forrás: (Kristóf 2013)

A **PBR** modellezésére a legelterjedtebb szimulációs módszerek evolúciós sorrendben a következők:

3.1.1. EULERIAN–EULERIAN

Az **Eulerian-Eulerian** féle többfázisú modell átlagolja a Navier-Stokes egyenletek eredményeit a térfogaton túl, beleértve a tetszőleges részecskéket és a folyamatos fázist. Megoldja a folyadék- és szilárd fázisok folytonossági, tömeg és mozgásegyenleteit, és követi a térfogati frakciót („ANSYS Fluent 15 Users Guide” 2013). Ez a rendszer csak egyetlen nyomás mezőt használ minden fázisban, így a nyomás mező azonos, függetlenül attól, hogy az áramlási forma folyamatos vagy **diszperz**. Az **Eulerian-Eulerian** megközelítés egyaránt figyelembe veszi az **Eulerian** reprezentáció folyamatos és diszpergált fázisait, ami minden fázisban szükségessé teszi a tömeg és a lendület egyensúlyát (Bertola, Vanni, és Baldi 2002). Például a másodlagos fázisban lévő cseppecskék vagy buborékok az elsődleges vagy a folytonos fázisban diszpergálódnak. A fázisok keverednek vagy szétválhatnak és a másodlagos fázis térfogati hányada és 0~100% között változhat. Ahol a felület határának pontos leírása fontos, mint például rétegzett szabad felületű áramlásnál már az **Eulerian-**

Eulerian számítási mód nem megfelelő. A buborékoszlopok **PBR**-ekben az **Eulerian-Eulerian** megközelítés a buborékfelhőt folyamatos közegként kezeli, amely analóg tulajdonságokkal rendelkezik a folyadék tulajdonságaihoz képest (Bertola, Vanni, és Baldi 2002).

További részleteket a többfázisú **Eulerian-Eulerian** modell irányadó egyenleteiről a következőkben felsorolt szakirodalmakban olvashatunk (dos Santos és mtsai. 2007; Krishna, van Baten, és Urseanu 2000; Szafran és Kmiec 2004; Yoo és mtsai. 2009b, 2009a).

3.1.2. LAGRANGIAN–EULERIAN

A **Lagrangian-Eulerian**-megközelítésben a folyadék fázis és a gáz fázis is folytonos mezőként (diszperziós közeg) értelmezhető, de az apró részecskékből álló fázist egyedülálló részecskékként (diszpergált fázis) kezelik, amelyek mozgását a rájuk ható erők eredményeként számolják ki. Az első lépésben az áramlási mezőt a „kvázi-homogén” gáz-folyadék diszperzió egyenleteiből számítják ki, ahol az átlagos sűrűség az algák pillanatnyi gázfogyasztásának arányában (**gas hold-up**) változik. A második lépésben a helyi gázeloszlást (**gas hold-up**) úgy határozzák meg, hogy a rendszer minden egyes buborékját nyomon követik az aktuális áramlási mezőben, és mindkét lépést addig ismétlik, amíg a konvergencia meg nem születik. Egy újabb gondolat a **Lagrangian-Eulerian**-formulát alkalmazva, az oszlopon átáramló minden egyes buborékot modellezi. A turbulens diszperzió következtében fellépő buborékok mozgása miatt a **Lagrangian-Eulerian** szimuláció sokkal alkalmasabb a folyamatok elemzéséhez (Joshi 2001). Általa lehetővé válik a buborék dinamikus tulajdonságainak jellemzése, beleértve a buborékpályát és a buborék-buborékkal valamint a buborék-folyadékkal kapcsolatos további kölcsönhatások közvetlen vizsgálatát (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007).

A **Lagrangian-Eulerian** módszer előnye, hogy a buborék egyesülése majd újra szétesése – tömegátadás és a kémiai reakció nélkül – közvetlenül hozzá adható a modellhez. Másik előnye – mivel a buboréknyomot pontosan kiszámíthatjuk egy adott térfogategységen belül –, a diszpergált fázisban nincs numerikus diffúzió (Joshi, 2001). Ennek feltétele, hogy ebben a megközelítésben a homodiszperz rendszerben a gázbuborékot kisméretűre korlátozott gömb alakúnak kell tekinteni. (Akhtar et al., 2007). Abban az esetben, ha nagyméretű, deformálódott buborékokat vizsgálunk, akkor már heterodiszperz rendszerről beszélünk. (Yong Li, Zhang, és Fan 2000). A **Lagrangian-Eulerian**-megközelítés realizitkusabb, de a

pontos modellezéshez szükséges elegendő számú részecske követése nagy számítási memóriát és sebességet igényel (Delnoij és munkatársai, 1997).

3.1.3. MIXTURE

A *Mixture* modell az *Eulerian* modell egyszerűsített változata. Sok esetben robusztusabb, kisebb a számítási ideje és a memóriaigénye. A modell a keverék kontinuitását, mozgás- és energia-egyenletét, továbbá a másodlagos fázisok térfogat-koncentráció egyenletét képes megoldani.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_p) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{qp} - m_{pq})$$

A másodlagos fázisok relatív sebességét algebrai összefüggés alapján számolja. Feltételezi, hogy a relatív sebesség „azonnal” beáll (pl. jóval kisebb, mint a keverék sebessége). Egységes turbulencia jellemzőket feltételez. A kavitációs és granulátum-ágy modellel egyaránt alkalmazható (Kristóf 2013).

Ez a modell lokálisan homogén áramlást feltételez, amelyet a fázisarányokkal, mint mezőváltozókkal írunk le. A keverék összegzett mozgásegyenletét oldjuk meg átlagolt anyagjellemzőkkel. Megoldjuk továbbá a fázisok közötti viszonylag kis elcsúszási sebességre vonatkozó mozgásegyenletet is (Bitog és mtsai. 2011).

3.1.4. VOF

A *VOF* szimulációs módszer egyike a legjobban ismert technikáknak a buborék oszlop *PBR*-ek esetében. Csak a *VOF* modell képes egy buborék raj vagy folyamatos lánc viselkedését modellezni egy buborék oszlopban. Számos tanulmány megfogalmazta egyetlen buborék dinamikus viselkedését más megközelítést használva, de nem tudják pontosan modellezni (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007).

A *VOF* módszerben a buborék-buborék kölcsönhatása és a magasabb szintű turbulencia kezelése egyre fontosabbá válik a folyamatos láncolatba szerveződő buborékok vizsgálatakor, ahol a fázisok közti erőkon alapuló modellek egyetlen buborék tanulmányozásával, nem nyújthatnak jó eredményt (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007). A *VOF* algoritmusát úgy tervezték, hogy az nyomon követi a határfelületek helyzetét is két vagy több nem elegyedő folyadék között. Ez a módszer rugalmasabbnak és hatékonyabbnak bizonyul a bonyolult független határfelületek kezelésére szolgáló egyéb módszereknél. Különösen alkalmas a mennyiségi

követésre (volume tracking). Ezek a módszerek a fázishatáron a transzport egyenletek egy csoportjával, a megfelelő határfeltétel ugrásokkal oldják meg az összes fázis mozgását (Delnoij, Kuipers, és van Swaaij 1997; Delnoij és mtsai. 1997; Hirt és Nichols 1981; Krishna és van Baten 1999). A buborék mozgásának szimulálására szolgáló **VOF** megközelítés a Navier-Stokes egyenleteken alapul, amelyet a kevert fázisra adnak meg. A folytonossági (kontinuitási), valamint az egyedi mozgás-egyenlet megoldható az egész tartományban és elosztva az összes fázisban („ANSYS Fluent 15 Users Guide” 2013). Az egyes lépések (tracking) egy fázis kontinuitási egyenletének megoldásával elvégezhető, amennyiben a kapott térfogati frakcióban hirtelen változás mutatkozik, az a határfelület helyét jelzi. A folyadék elegy mozgásegyenlete a keverék anyagi tulajdonságai alapján oldható meg, így annak tulajdonságai fognak megjelenni a határfelületi ugrásoknál. Ehhez hasonló módon a turbulencia és az energia egyenlete is megoldható. Számítási tényező még a felületi feszültség, az algák faji keveredése, a fali tapadásuk (adhézió), valamint a fázisok összenyomhatósága. A **VOF** szimulációs technika különösen egy folyadék oszlopban lehet hatékony eszköze az egyedi légbuborékok emelkedési sebességének tanulmányozására, valamint a félgömb tetejű buborékok közötti kölcsönhatás modellezésére (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007; Krishna és Van Baten 2001).

Összefoglalva a **VOF** szimuláció előnye, hogy a buborék felbomlását és az egyesülését áttekinthető módon kezeli (Lörstad és Fuchs 2004), továbbá lehetővé teszi a nagy berendezések diszpergált többfázisú áramlás szimulációjának feldolgozása során az intenzív memória használatot (Ranade és Tayalia 2001). Hátránya a gázbuborékok úgynevezett mesterséges (vagy numerikus) összeolvadása, amely akkor következik be, ha egymás közötti távolságuk kisebb, mint a számítási cellák mérete.

A **VOF**-szimulációs módszerről további részletes információk (Krishna és Van Baten 2001; Yoo és mtsai. 2009a) által közölt cikkekben található.

3.2. TURBULENCIA MODELLEK

A legtöbb **CFD** szimulációban a turbulencia modellezés kulcskérdés. A turbulencia kezdeti emelkedésekor a **PBR**-ben, néhány mikroalga növekedési rátája nő, a gázsebesség túlzott mértékű növelésével azonban sejtkárosodás következik be. (Merchuk, Gluz, és Mukmenev 2000). Ahhoz, hogy a **PBR** hidrodinamikájáról pontos előrejelzést kapjunk, nagyon fontos számos tényező, mint a buborék mérete, a rács felbontás és a turbulencia modell kiválasztása (Gimbun 2009).

Ezeket a *modelleket* Kristóf Gergely munkája alapján következő képpen sorolhatjuk be (Kristóf 2013):

Algebrai modellek:

- **Lokális deformáció, sebesség, hosszlépték:** (pl. faltávolság alapján) nem vesz tudomást az áramlás „előzményéről”. Komplex geometriánál a falvastagság nem egyértelmű.

Transzport egyenletre épülő Reynolds átlagolt (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) modellek:

- **Spartan-almars (1. fv.):** szárnyprofilok, 2D falközeli áramlások közelítésére (sugaras szétterülést 100% hibával számolja),
- **$k-\varepsilon$ (2. fv.):** izotrop 3D turbulencia esetében általánosan használt,
- **$k-\omega$ (2. fv.):** jellemzője a viszkózus alapréteg átmenet,
- **RSM (7. fv.):** anizotrop turbulencia esetén (pl. szekunder áramlás, ciklonok) használt, akár tízszer több iterációt is igényel.

A turbulens mozgás felbontására épülő modellek (Scale Resolving Models SRM):

- **DNS:** teljesen felbontott turbulencia. A számításigény $Re^{9/4}$ -el arányosan nő. Rengeteg szükségtelen adatot generál.
- **Large Eddy Simulation LES:** csak a nagy örvényeket bontja fel. A kisebb örvények hatását SubGrid scale Stress modellekkel kell vizsgálni. A falhoz közeledve egyre finomabb háló szükséges.
- **DES SAS:** fal közelben RANS modellt használ (pl.: Spalart–Allmaras modellt) távolabb átmeny *Large Eddy Simulation LES*-be.

A kétfázisú áramlási szimulációban a (Launder és Spalding 1972) által közzétett **$k-\varepsilon$** turbulencia modellt széles körben használják (lásd még a **III. melléklet**) Ez annak köszönhető, hogy egyszerű, és bizonyos mértékig a falhoz kötött turbulens áramlásokat is feltételezi (Joshi 2001).

3.2.1. K-EPSILON MODELL

Három különböző lehetőség áll rendelkezésre a többfázisú áramlás turbulencia modellezésére az ANSYS FLUENT-ban, nevezetesen a *keverék*, a *düszpergált* és a *kétfázisú $k-\varepsilon$* modellek („ANSYS Fluent 15 UDF Manual” 2013). Mindhárom turbulencia modell ugyanazt

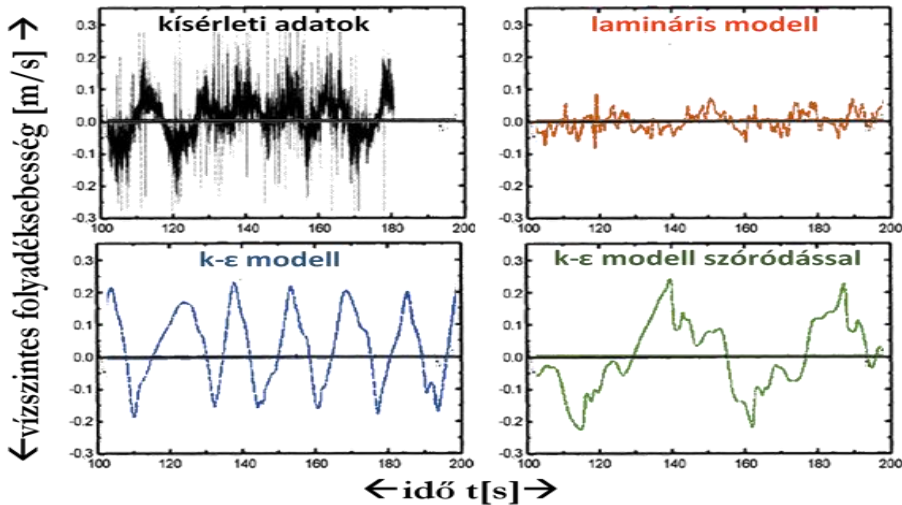
a modell állandót alkalmazza, de különböző egyenletekkel dolgozik a turbulencia viszkozitására (Gimbun 2009). A legáltalánosabb turbulenciamodell minden egyes fázisra megoldja a k és ϵ transzport egyenleteket. Gimbun, ezeknek a modelleknek a megfelelő felhasználását tárgyalja.

A *keverék* modell akkor alkalmazható, ha a fázisok szétválaszthatók rétegzett (vagy szinte rétegzett) többfázisú áramlásokra és amennyiben a fázisok közötti sűrűségarány közel van az 1-hez. Ebben az esetben, felhasználva a keverék tulajdonságait és mozgását, hatékonyan meg lehet határozni a turbulens áramlás fontos jellemzőit.

A *diszpergált k-ε* modell akkor alkalmazható, ha a másodlagos fázis híg és az elsődleges fázis egyértelműen állandó. Amikor a *diszpergált k-ε* turbulencia modellt alkalmazzuk a standard *k-ε* egyenleteket az elsődleges fázisban meg kell oldani. Ez a turbulencia modell a megfelelő választás, ha a fázisok közötti turbulencia-átvitel domináns szerepet játszik, vagyis nagy a gázmentes frakció.

A *kétfázisú* turbulencia modellt akkor használják, ha a gáz-folyadék modellezésre alkalmas turbulencia modell nagymértékben függ a diszpergált fázis arányától és ez magas, akár 30% arányú (*gas hold-up*) (Pfleger és mtsai. 1999).

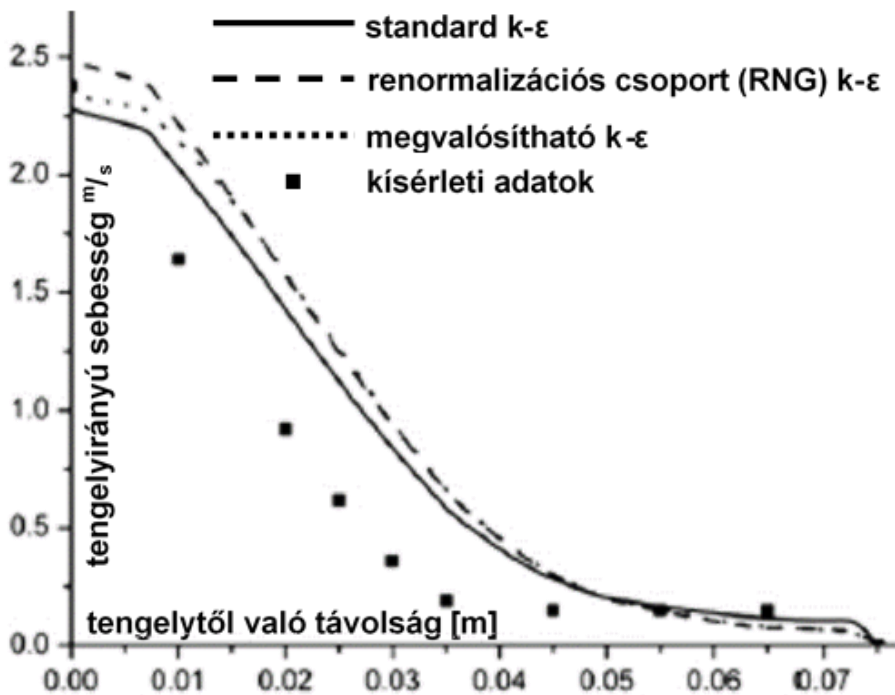
Pfleger és mtsai. *k-ε* turbulencia modell alkalmazásával lamináris és turbulens szimulációkat végeztek, és minősített eredményeik, helyes képet mutatnak a teljes folyadékkeringésről (Pfleger és mtsai. 1999) (10. ábra)



10. ábra A vízszintes folyadék sebességének idősorai a buborékoszlop középpontjában.

Forrás: (Pfleger és mtsai. 1999).

Standard $k-\varepsilon$ -t egyenleteket használtak a buborékoszlop PBR -nél az egyenletes folyadékáramban bekövetkező turbulencia leírására. Az eredmények azt mutatták, hogy egy turbulens modellt kell figyelembe venni, hogy helyes eredményeket kapjanak. Azonban lamináris modell kaotikus viselkedést mutatott, és nem a kísérletek során megfigyelt harmonikus rezgéseket. A folyadékfázis turbulens leírásával egy formailag megfelelő sebesség profilt találtak. Az eredmények jól illeszthetők a közepes és a nagyobb méretű kísérleti berendezésben végzett mérések adataihoz. Egy jet-loop PBR -ban ábrázolták $k-\varepsilon$ modellek tengelyirányú sebességét, amelyet összehasonlítottak kísérleti adatokkal (Szafran és Kmiec 2004). Az eredmények azt mutatták, hogy a tovább fejlesztett $k-\varepsilon$ modellek nem hoztak szignifikánsan nagyobb pontosságot (11. ábra), viszont hosszabb számítási időt eredményeztek.



11. ábra Az előrejelzett víz-tengelyirányú sebességprofilok összehasonlítása a csőcsőszakban 215 mm távolságra a kivezető nyílástól a különböző turbulencia modellekhez, kísérleti adatokkal.

Forrás: (Szafran és Kmiec 2004).

A standard ***k-ε*** egyenletek sebességi profilja közelebb áll a kísérleti adatokhoz, de a modellek közötti különbségek a teljes számítási hibához képest elhanyagolhatók. A standard ***k-ε*** egyenletek alkalmazása a leggyorsabban konvergáló ugyanakkor stabil megoldás is.

3.2.2. K-OMEGA MODELL

Ennél a modellnél az ϵ helyett ω -ra oldjuk meg az egyenletet (ez a turbulencia második paramétere az örvényfrekvencia, jelölése az ω és ez arányos ϵ/k -val). A fal közelében kedvezőbben viselkedik a ***k-ε*** modellnél, viszont a szabad áramlás esetén rosszabb. Ennél a modellnél már számolható a határreteg tranzíciója (lamináris-turbulens átmenet) is, azért is érdemes használni, mert a további fejlesztések várhatóan ebben lesznek.

3.2.3. LES MODELL

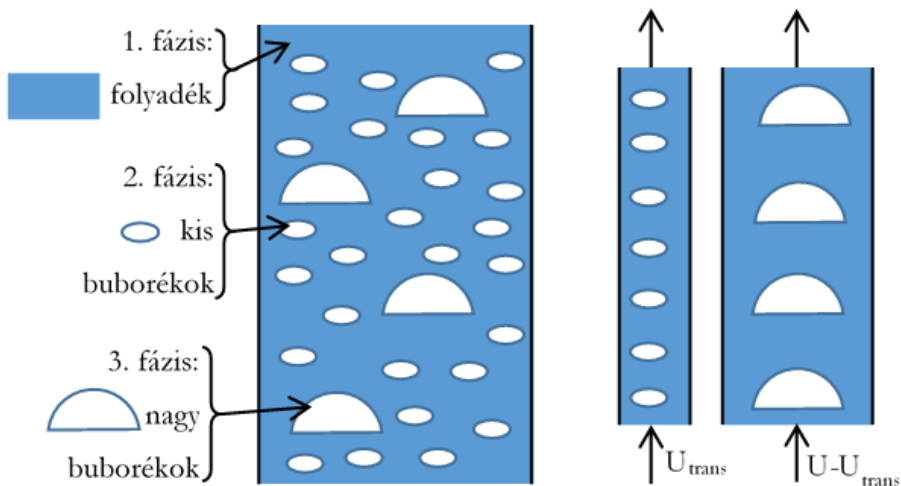
Ezt a kidolgozott turbulenciamodelt, amit ***nagy örvény szimuláció***-nak ***Large Eddy Simulation (Large Eddy Simulation LES)*** neveznek a közelmúltban alkalmazták a buborékoszlop kétfázisú áramlásának modellezésére (Dhotre és Joshi 2007). A turbulencia modell alkalmazása többfázisú áramlásban rendkívül összetett kérdés, mivel a mozgást leíró egyenletek soktényezős egyenletek (Szafran és Kmiec 2004). A kísérletekben megfigyelték, hogy az oszcilláció nem harmonikus, a lamináris modell kaotikus viselkedést mutat. Találtak egy helyesen kialakított sebesség profilt a folyékony fázis turbulens leírására.

4. A PBR MODELLEZÉSEK FŐBB CFD ESETTANULMÁNYAI

A *CFD* számítások igen jelentősek, mivel bizonyították, hogy a diszpergált gáz és a szilárd fázisok közvetlen kölcsönhatásait helyesen kell modellezni. A legkülönbözőbb számítógéppel készített szimulációs esettanulmányokat **III. melléklet** tartalmazza. Az alábbiakban bemutatott esettanulmányokat a következők szerint csoportosítottam:

4.1. A MODELLEZÉSI SZIMULÁCIÓ

Krishna és munkatársai az Eulerian-Eulerian modellt alkalmazva a *méretarány* problémák kiküszöbölését célozta meg a gáz-folyadék-szilárd-fázis szimulációjával. A vizsgálat egy turbulens áramlással rendelkező buborékoszlop *PBR*-ben történt (Krishna, van Baten, és Urseanu 2000). Kétféle megközelítést hasonlítottak össze: a tengelyszimetriát feltételező szimulációs modellt és a hengeres oszlopok teljes háromdimenziós modelljét. A szimulációk eredményei rámutattak arra, hogy a háromdimenziós szimulációban kaotikus viselkedés fordul elő (**12. ábra**), míg a tengely-szimmetriát feltételező kétdimenziós szimulációk elégséges pontossággal rendelkeznek, a keringtetett folyadék áramlási sebességének átlagos gázbuborék eloszlás (*gas hold-up*) becsléséhez.



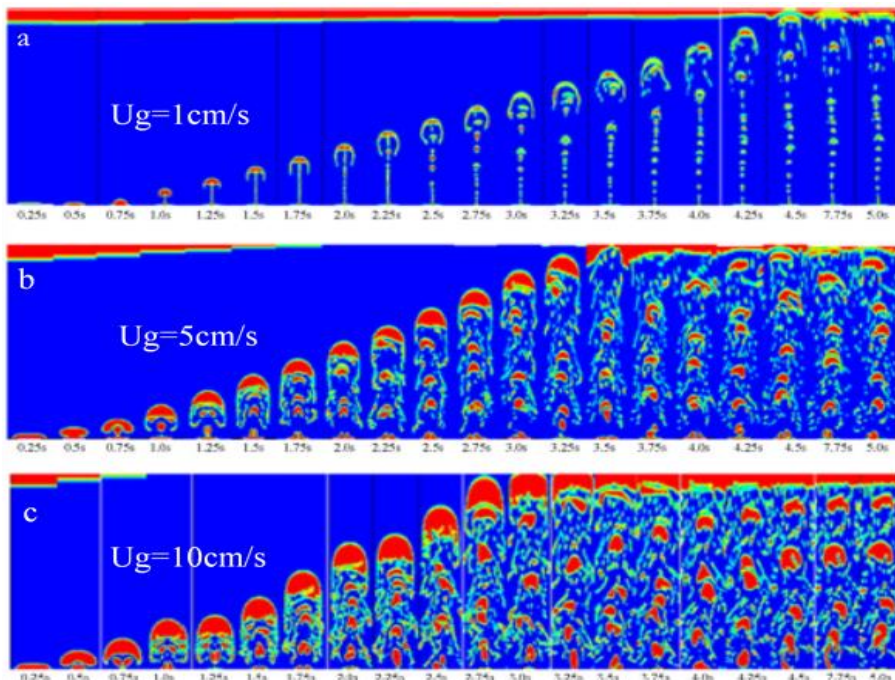
12. ábra Buborékoszlopban működő háromfázisú modell turbulens rendszerben,

Forrás: (Krishna, van Baten, és Urseanu 2000)

Bertola és munkatársai Eulerian-Eulerian modellt alkalmazva vizsgálták a buborékoszóva időfüggő mozgását és az időben átlagolt áramlási mintát a buborék oszlop *PBR*-ben. A **Prandtl keverési hossz** (*Prandtl MLH*) és a *k-ε* turbulencia modell közelítések

összehasonlítására a szimulációkat 2D-ben végeztek. A kísérleti (nem ipari méretű) rendszerben az előre jelzett nagy **turbulens viszkozitás** (*Turbulent Viscosity*) miatt egyik modell sem tudta stabilizálni a rendszer instabil állapotát (Bertola, Vanni, és Baldi 2002).

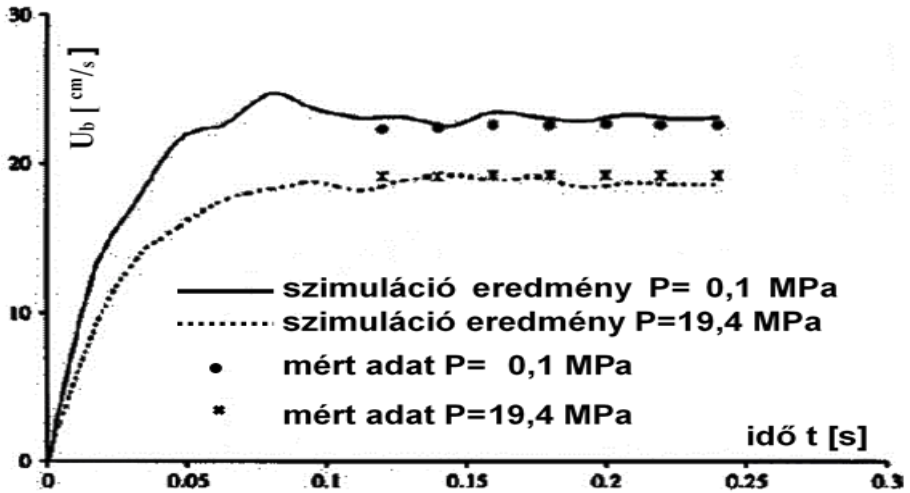
Akhtar és munkatársai korábban a levegő-víz rendszerben vizsgálták a működési és tervezési paraméterek hatását a buborékméret-eloszlására és a buborék-emelkedési pályájára vonatkozóan. Már 2007-ben a **VOF** modellt alkalmazták, abból a célból, hogy a folyadékoszlopban megvizsgálják az *emelkedő folytonos buborék lánc hidrodinamikáját* közepes, vagy magasnyomású közegben. A szimulációk eredményei különböző méretű buborékok képződését mutatják, a kis, a közepes és a magasabb gázsebesség esetén (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007) (**13. ábra**).



13. ábra A gáz felületi sebessége két-dimenziós hatása a buborékméret-eloszlásra.

Forrás:(Akhtar, Pareek, és Tadé 2007)

Yong Li és munkatársai szintén a **VOF** modellt használták, a különböző *felületi sebességek és a porlasztó buborékpályáinak* elemzése rámutatott arra, hogy kis buborékok képződnek oszcilláló viselkedésű alacsony felületi gázsebességnél. A **14. ábrán** látható szimulációs eredmények mutatják, hogy a nyomás a buborék méretét befolyásolta, a nyomás növekedésével a stabil maximális buborék mérete csökken (Yong Li, Zhang, és Fan 2000).

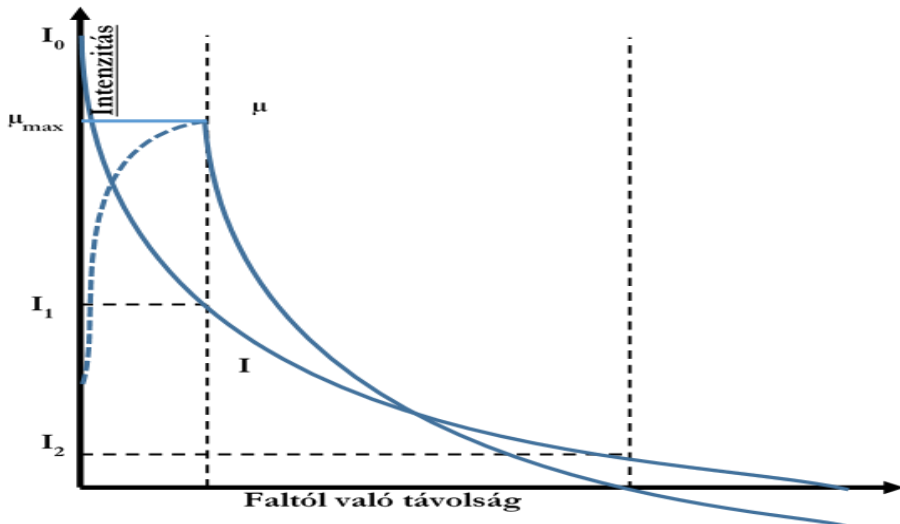


14. ábra A szimulált és a kísérleti sebességek különböző nyomások mellett

Forrás: (Yong Li, Zhang, és Fan 2000)

4.2. A FÉNY SZIMULÁCIÓ

Annak ellenére, hogy a fény a **PBR**-en belüli jelenléte a legfontosabb tényező az algák növekedésének szabályozásában a legtöbb buborék oszlop **PBR**-ben végzett szimulációs vizsgálatok a fény behatolás (penetráció) elemzése korlátozott. A 15. ábra egy sematikus rajzzal szemlélteti a megvilágítás exponenciális romlását, külső megvilágítás mellett.



15. ábra Az alga növekedése a megvilágított faltól a megvilágítás függvényében

Forrás: (Merchuk és Wu 2003)

Az ábrán jól látható, hogy az algaszaporodás a **PBR** falától számítva három eltérő növekedési sebességgel rendelkező zónára osztható (Merchuk és Wu 2003). Az első zóna a megvilágított faltól addig a pontig terjed, amíg a fényenergia bevitel egyensúlyban van a maximális növekedési sebességhez szükséges energiával (I_1). A második zóna azon a ponton ér véget, ahol a fény energiafelvétele éppen, hogy csak kiegyensúlyozza a fenntartáshoz szükséges energiát (I_2). A harmadik zóna pedig az, ahol a korlátozott fényerő miatt a növekedés negatív. A sematikus ábrázolás bonyolultabbá válik, ha figyelembe vesszük a fotóinhibíciót, mivel ez a növekedési sebesség csökkenéséhez vezet az első zónában, közel a fényforráshoz (szaggatott vonal) (Merchuk és Wu 2003).

Perner-Nochta és munkatársai a *fényintenzitás változásának* szimulációit végezték. A vizsgálat tárgyát a fotoszintetikus reakciókat befolyásoló fényszóródás és annak időbeli és térbeli vonatkozásai képezték. Az algasejtek pályáját elemezték, az egy sejtre jellemző fényingadozás mértékének megállapítása céljából. Először **CFD** szimulációval megvizsgálták, hogy a statikus keverőt használó csöves **PBR** méretarányos növelése vagy csökkentése mellett lehetséges-e a sugárirányú áramlás pályaelemzése (Perner-Nochta és Posten 2007).

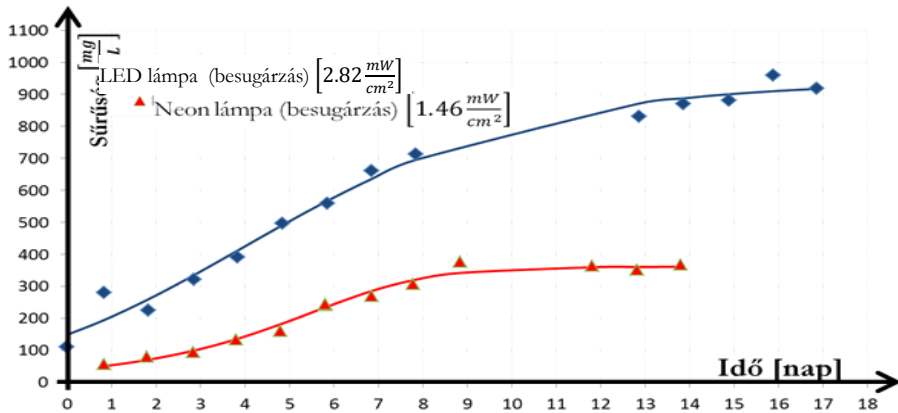
Trujillo és munkatársai a *sugárzás eloszlását* egy új külső megvilágítású rögzített, katalizátoros buborék oszlopos **PBR**-ben elemezték. Arra a megállapításra jutottak, hogy a gázbuborékolás jelentősen, növeli a beeső sugárzást a gáz-folyadék keverékben, fokozva a sugárzást és az ezáltal elnyelt sugárzás mennyiségét egy titánium bevonatú lemezen. A **CFD**-ben elért eredmények, lehetővé tették egy szerves szennyező anyagok lebomlásával foglalkozó szoláris fotokatalitikus reaktor optimalizálását. (Trujillo, Safinski, és Adesina 2007).

Perner és munkatársai Trujillo-val szemben egy másik lemez **PBR** geometriájának **CFD**-ben történt numerikus optimalizálása során elérték, hogy nőtt a *fénybeviteli képessége* és 70%-kal csökkent a nyomásvesztés mértéke. Ez a tanulmány arra is határozottan rámutatott, hogy az áramlás geometriája csökkentheti a lerakódást és befolyásolja az elégtelenül kevert zónákat. (Perner, Posten, és Broneske 2003).

Pramparo és munkatársai a torus alakú **PBR** geometriájának a mikroalgák növekedésére gyakorolt hatását vizsgálták. A **PBR**-t úgy tervezték meg, hogy lehetővé tegye a fény szabályozást, miközben hatékony keverést biztosít a lapátkerék segítségével. Magas fokú

keveredés volt megfigyelhető, amely bemutatta ennek az innovatív geometriának a jelentőségét. Megállapították, hogy mindenek ellenére, a torus **PBR** kevésbé előnyös a léptéknövelés és a gyártás szempontjából (Pramparo és mtsai. 2008; Pruvost, Pottier, és Legrand 2006).

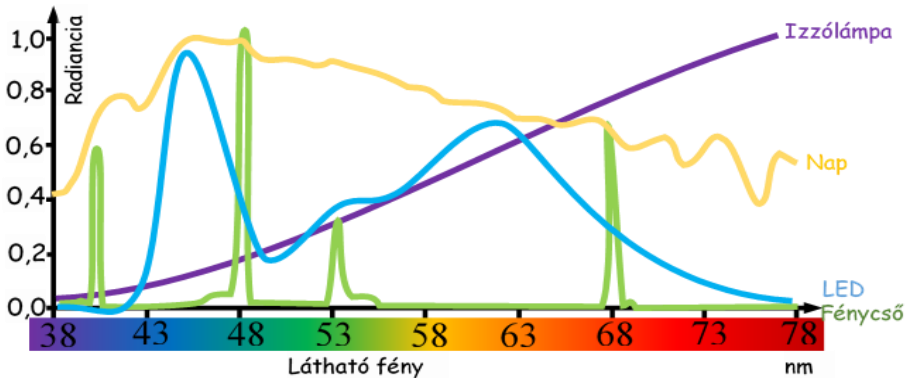
Korábbi kísérleteink során melyeket a Biológia Rendszerek és Élelmiszeripari Műszaki Tanszékünkön végeztünk az algatermelékenységet *különböző típusú megvilágítások* mellett vizsgáltuk. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a LED fényforrással az algatermelékenység hatékonyabb, mint a Neon fényforrással (Neményi és mtsai. 2015). (16. ábra)



16. ábra LED valamint Neon világítás hatása a termelékenységre

Forrás: (Neményi és mtsai. 2015)

A nagyobb termelékenység annak köszönhető, hogy a LED fényforrás nagyobb intenzitással sugároz a chlorophyll fényhasznosítási tartományában, mint a fénycső (17. ábra).



17. ábra A nap és a leggyakoribb mesterséges fényforrások spektrumának összehasonlítása a látható fény tartományában

Átszerkesztve forrásból: (Végvári 2015)

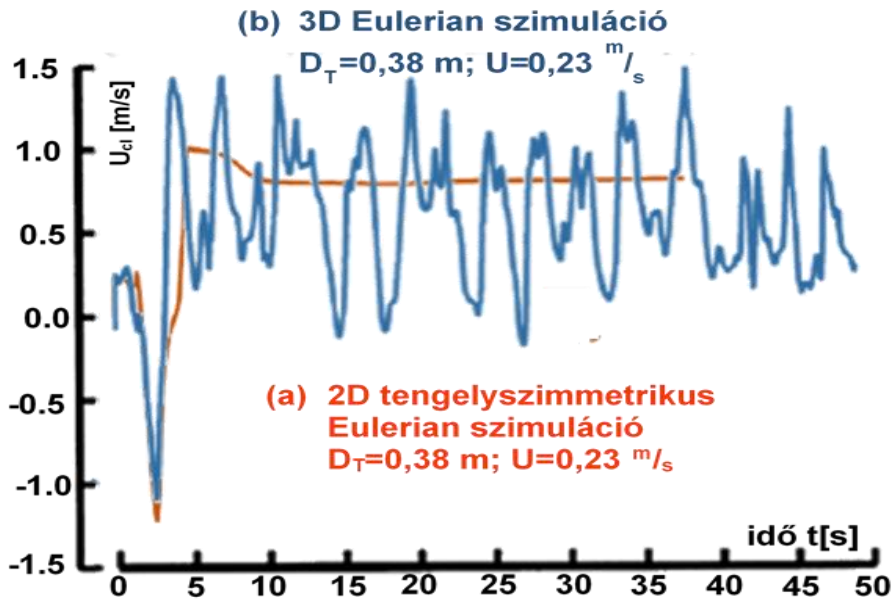
4.3. A GÁZ SZIMULÁCIÓ

A **PBR**-ek alján át buborékoltatva bevezetett CO₂ gáz általános módszere a *gázelosztás* kivitelezésének. Az emelkedő buborékoknak fontos szerepe van a folyadék keverésében és az anyagátadásban (Akhtar, Pareek, és Tadé 2007).

Nagy előrelépést jelentett a buborék áramlás hidrodinamikájának modellezése különösen a buborék oszlop **PBR**-ekben (Huang és mtsai. 2010; Laín, Bröder, és Sommerfeld 2001). Még mindig nagy kihívás azonban az anyagcsere és az anyagok keverés folyamatainak modellezése a buborék keltette áramlásban. azért, mert a buborék raj – a viselkedést meghatározó felületi átviteli jellemzőkkel – nem követi az izolált buboréknál fellépő határfelületi transzfer törvényeket. (Ayed, Chahed, és Roig 2007). Ezek a modellek változatos geometriai formákkal rendelkeznek. Ezért nagyon fontos és szükséges a validálásuk abból a célból, hogy megtalálják azokat a paramétereket, amelyek leírják a fázisok közötti anyagátadást. Így pontosan és használhatóan széles üzemi körülmények között megjósolható a gázelosztás (Huang és mtsai. 2010).

A *légbefúvásos PBR*-ek hidrodinamikáját vizsgálták van Baten és mtsai, ahol a kísérleti eredményeket és a **CFD** szimulációt alaposan összehasonlították. A szerzők beszámoltak a buborékok és folyadék közötti kölcsönhatásokról, mozgási energia átadás, vagy irodalomból származó korreláción alapuló ellenállás tényező segítségével. A számítások tengelyszimmetrikus kétdimenziós rácsokra feltételezhetően érvényesek, mivel a kísérletek eredményei és a szimulációk jó egyezést mutattak. A kétdimenziós tengelyszimmetria feltevése olyan sugárirányú profilokat eredményezett, amelyek parabolikusabbak, mint a teljesen háromdimenziós szimulációk. Ennek megfelelően a **CFD** modell potenciálisan alkalmazható a méretnövelés eszközeként (van Baten, Ellenberger, és Krishna 2003).

Krishna és munkatársai próbáltak szimulálni többfolyadékos (multifluid) jellemzően háromfázisú rendszereket is. Az első kísérleti háromfázisú rendszerben, egy buborék oszlop **PBR**-ben a „kis” és „nagy” buborékokat az *Eulerian-Eulerian* modellel írták le. (18. ábra).



18. ábra 2D és 3D CFD Eulerian-Eulerian szimulációja

Forrás: (Krishna, van Baten, és Urseanu 2000)

A buborékok sokaságát, a folyadék közötti mozgás átadást, a súrlódási együtthatókat vizsgálták, amelyek különböztek mind a „kis”, mind a „nagy” buborékok esetében. A tanulmány azonban korlátozott használhatóságú, mivel a különböző méretű buborékfázisok közötti kölcsönhatást figyelmen kívül hagyták. (Krishna, van Baten, és Urseanu 2000).

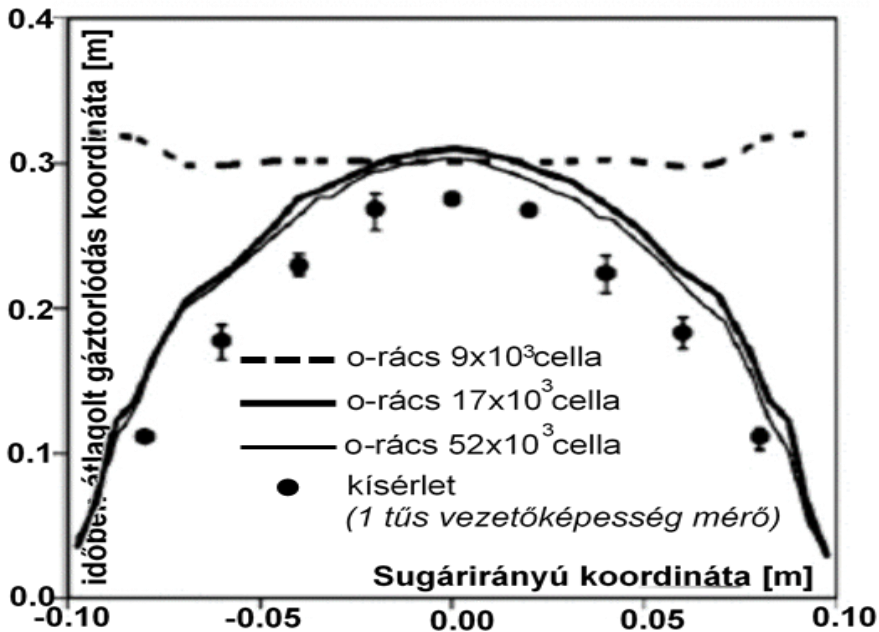
A **PBR** geometriája és típusa nagymértékben befolyásolja a benne lévő fázisok tulajdonságait és sebességét (Reyna-Velarde és mtsai. 2010). Sanyal és munkatársai megállapították, hogy egy egyszerű, kétdimenziós tengelyszimmetrikus szimuláció is használható ahhoz, hogy a teljes áramlási mintáról, és a gáz térfogat arány (*gas hold-up*) eloszlásról adatokat kapjanak. Azt is rögzítették, hogy az átmeneti, kétdimenziós tengelyszimmetrikus szimuláció egy laboratóriumi méretű hengeres buborék oszlop **PBR**-ben, buborékos áramlással és habos turbulens körülmények között is működik. Egy buborék oszlop **PBR**-ben – amely általában nem tengelyszimmetrikus – a tranzienst áramlási struktúra felállításához azonban háromdimenziós modellel kell számolni (Sanyal és mtsai. 1999).

A **CFD** szimulációkban az áramlási sebességek adatai teljesen függetlenek a rácscellák számától. A rács elrendezésének és sűrűségének megválasztása, különösen a fal közelében,

nagyon fontos a numerikus módszereknél (Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007; Szafran és Kmiec 2004).

Egy szimmetrikus kialakítású sugár-hurok (jet-loop) *PBR*-ben végeztek strukturált és strukturálatlan hálótervezést (Szafran és Kmiec 2004) a számítási idők és a szükséges rendszer erőforrások csökkentésére. Az első háló teljes strukturált négyyszögletes cellákkal a mag- és a közeli falrészén, míg a második háló strukturálatlan, a magterületen háromszög alakú, a fal közelben négyyszögletes cellákból állt. A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a strukturálatlan háló csökkenti a tengelyszimmetrikus megoldó (SOLVER) által okozott szimmetria-tengely eltéréseket, és pontosabb is.

Hasonló megközelítést alkalmaztak, amikor átvették a strukturálatlan háló kialakítását (Blažej és mtsai. 2004; Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007) egy hengeres buborék oszlopot és a légbefúvásos *PBR*-et illetően. Nagyon fontos volt, hogy a fal közelében rögzítsék a gradienseket, ahol az áramlás várhatóan párhuzamos a hengeres fallal. Az említett feltétel teljesítéséhez a fal közeli "0" típusú rácsokat használtak. Ahol nagymértékű cella torzulásokat (skewness) tapasztaltak, annak csökkentése céljából hatszögletű (hexaéderez) számítási cellákat hoztak létre. (Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007) szintén vizsgálta a számítási cellák számának (9000-52000) hatását (lásd a 19. ábrán).



19. ábra A rácsméret hatása a gáztartalomra és axiális folyadéksebességre

Forrás: (Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007)

A buborék oszlop **PBR** teljesítményét vizsgálták még lyuggatott lemezen porlasztott gázáram által keltett áramlás szimulációjával is. Átfogóan elemezték az áramlási mintákat és a lyukakon át áramló gáz sebességét. (Dhotre és Joshi 2007).

Simonnet és munkatársai azt vizsgálták, hogy mennyire fontos az emelőerő meghatározása egy buborék oszlop **PBR**-ben. A buborékok közötti kölcsönhatásokból következően megállapították a rendszer néhány tipikus jellemzőjét (parabolikus sebességprofilok, tipikus tranziens jelenségek, nagy buborékok felhalmozódása az oszlop közepén az átmeneti és heterogén rendszerekben) (Simonnet és mtsai. 2008).

Rampure és munkatársai összehasonlítva a **CFD** szimulációkat a buborékoszlop **PBR**-ek nagy gázsebességű hidrodinamikáját elemezték.

Thakre és Joshi egy buborék oszlop **PBR** áramlás szimulációját vizsgálták, elsősorban az emelő erő meghatározására szolgáló, sodródási fluxus állandók alapján, amely modellt korábban (Zuber és Findlay 1965) javasolt. A sodródási fluxus állandók meghatározásánál figyelembe veszik a gáz eloszlás (**gas hold-up**) profilját és a buborék emelkedési sebességet. A tanulmány egyértelműen bemutatja az áramlási sebesség profilját, ahol a maximális értékeket a középpontban a fal felé csökkenve határozták meg. Az áramlási sebesség értéket azonban nem lehet előre jelezni egy ismeretlen gáz-folyadék rendszerben, a **PBR**-en keresztülaramló kétfázisú függőleges keverék (folyadék-szilárd vagy gáz-folyadék) fázisai közötti sebességkülönbség miatt. Ezáltal a heterogén rendszerben az áramlási sebesség növelésére vonatkozó magyarázatokat is megadták. (Thakre és Joshi 1999)

A keverési idő szimulálásánál, fontos következtetéseket vontak le pl. a „multiple snapshots” azaz sorozatfelvételek feldolgozása során. Megállapították, hogy jelentősen csökkenthetik a számítások erőforrás szükségletét anélkül, hogy az veszélyeztetné a modell pontosságát. A meghatározott időintervallumokban rögzített két pillanatfelvétel között az áramlási mezők is tárolásra kerülnek, de ezek csak a felvételek közötti tömeg frakciók nyomjelző egyenleteinek megoldására használhatók. Azaz minden egyes új számolási ciklus elején a nyomjelző koncentráció eloszlást tárolja, és a következő áramlási pillanatfelvétel megoldására használja fel. (Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007).

A **k-ε** turbulencia modellt alkalmazó buborékoszlop **PBR**-ek áramlási mintáit egy, kettő és három dimenzióban vizsgálták. Mindegyik szimulációs konfiguráció eredménye jó egyezést mutatott a tengelyirányú és részleges gáz tartalmú profilok kísérleti adataival, kivéve

az örvénylés szóródási együtthatóját, amelyekhez csak a 3D-s előrejelzések készülhettek. A keverési hatékonyságot a tengelyirányú szóródási együttható jellemzi, ebben az esetben is csak a 3D modell mutatott kiváló egyezést. Arra a következtetésre jutottak, hogy az 1D és 2D modelleknél a hőáramlás korlátozott és megfelelően szűkebbé vált a **tartózkodási idő eloszlás** (*Residence Time Distribution, RTD*) (Ekambara, Dhotre, és Joshi 2005)

Blažej és munkatársai egy kétfázisú áramlás szimulációját, kísérleti légbefúvásos **PBR**-ben, végezték. A szimuláció során összehasonlítást végeztek a függőleges sebesség és a gáz eloszlás között (*gas hold-up*), ahol a felszálló ág felületi gáz sebessége volt a változó. A légbefúvásos **PBR**-ek esetén javasolták, a komplex, azaz több gáz / **diszkrét fázis modell** (*Discrete Phase Modell, DPM*) leíró egyenleteknek bevezetését, melyekkel pontosan lehet leírni a gáz és a folyadék mozgását (Blažej és mtsai. 2004).

A gáz eloszlását (*gas hold-up*) és a buborék raj sebességét az oszlop átmérője erőteljesen befolyásolja. A kísérletek igazolták, hogy az erősen viszkózus folyadékok, mint például az olaj a gázbuborékok összeolvadása (*gas hold-up*) csökkent a buborékoszlop átmérőjének növekedésével (Krishna és Baten. 2002).

Ranade és Tayalia vizsgálta a gázbefúvó tervezéséhez a **CFD** alkalmazhatóságát az alacsony buborékoszlop **PBR**-ekben, ahol a magasság és az átmérő aránya 2 volt. Két különböző gázkeverék által generáltak gázáramlást diszpergált gáz-folyadékáramlás szimulálására szolgáló kétfolyadékos modell alkalmazásával végezték a kísérletet. Megállapították, hogy miközben a felszíni gázáramlások növekednek a léptékhatás erősödik (Ranade és Tayalia 2001).

5. AZ IRODALMI ÁTTEKINTÉS ÖSSZEFOGLALÁSA

A **PBR**-t a természetendő élő szervezet (esetemben *Chlorella Vulgaris* alga) igényeinek megfelelően kell kialakítani. Az optimális alganövekedés elérése érdekében biztosítani kell megfelelő fényt, gázcserét (CO_2), megfelelő hőmérsékleti és pH viszonyokat. A **PBR** tervezését, optimalizálását elősegíti a folyamatok számítógépes modellezése. A berendezésben gázbefúvással létrehozott buborékoszlop által előidézett áramlástól függ a gáz és folyadékfázis keveredése, az algákat érő fényintenzitás értéke és változása, valamint a berendezés falán létrejövő algakerakódás mértéke.

A megfelelő áramlási viszonyok kialakításában nagy segítséget nyújtanak az áramlási folyamatok szimulációját számító program (**CFD**) algoritmusok. A kísérleti berendezés üzemeltetése során nyert tapasztalatok jelentős mértékben hozzájárulnak a **PBR**-ek kialakításához, átalakításához és hatékony üzemeltetéséhez.

ANYAG ÉS MÓDSZER

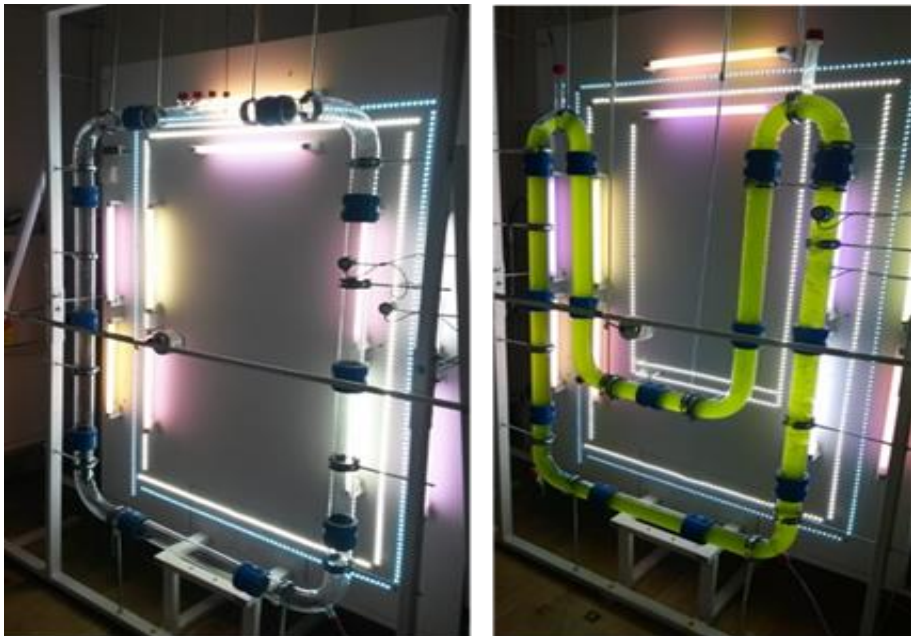
1. ALGA-TENYÉSZTŐ BERENDEZÉS

Első lépésként ki kellett választanom a kutatási témám eredményességéhez szükséges reaktortípust. A zárt rendszerű **PBR**-ek előnyeit egyes kutatók (Bitog és mtsai. 2011) tapasztalatait figyelembevéve a következőkben látom:

- a termesztés a legkülönbözőbb körülmények között megvalósítható,
- bizonyos mértékig megakadályozható, hogy a termelt törzseket elnyomjanak, túlszárnyaljanak más algák vagy nem kívánatos mikroorganizmusok, szennyeződések,
- a zárt bioreaktor rendszerek, nagyobb területi termelékenységet eredményeznek,
- a vízvesztés, a párolgás minimalizálható.

Kutatásom kezdetén rendelkezéseimre álltak egy korábbi pályázatban kifejlesztett **Flat plate**, és egy **Tubular** rendszerű algatenyésztő berendezés elemei. („Magas lipidtartalmú szuszpenziókból szerves anyag kinyerése és iparszerű hasznosítása” című GOP-1.1.1-11-2012-0157)

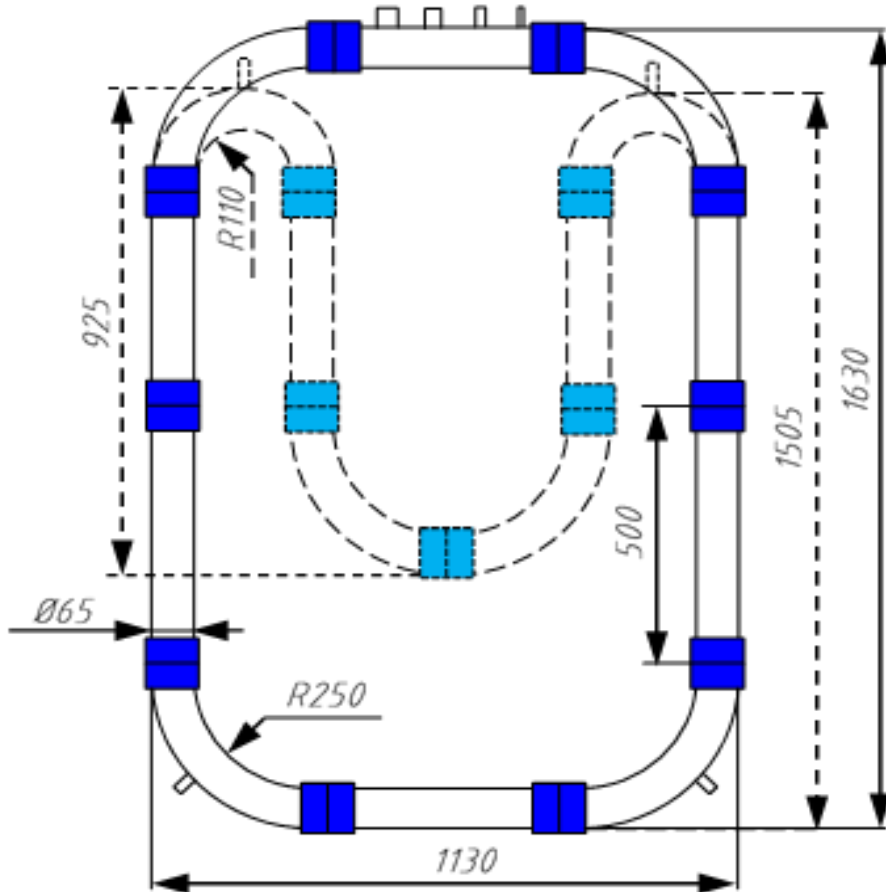
A **Tubular** rendszer kiépítése mellett döntöttem, mert azzal lehetőség nyílt a termelés folyamatos fenntartására. A rendelkezéseimre álló eszközökből vagy egy „O”, vagy egy „U” elrendezésű **Tubular PBR**-t lehetett összeszerelni (20. ábra).



20. ábra A korábbi GOP projekt „O” valamint „U” alakú összeszerelt elrendezései

Forrás: (Neményi és mtsai. 2015)

A fent említett pályázatban elvégzett termesztési kísérletek során azt tapasztaltuk, hogy az „U” elrendezés esetében a termelékenység 30%-kal nagyobb is lehet az „O” elrendezéshez képest, hátránya viszont, hogy az alga letapadásának valószínűsége a csőfalra megnő (Neményi és mtsai. 2015). A **21. ábra** a tanszéken korábban összeállított **PBR**-ek főbb méreteit mutatják.



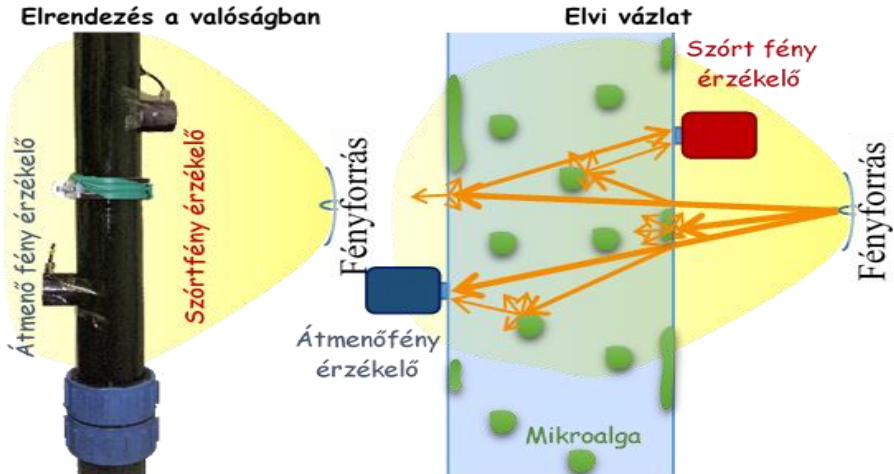
21. ábra Korábbi „O” valamint „U” elrendezésű bioreaktor összehasonlító méretezett rajza
Forrásból átdolgozva: (Neményi és mtsai. 2015)

Vizsgálataimhoz az „O” elrendezés továbbfejlesztett változatát használtam.

1.1. ALGA-TENYÉSZTŐKÖR KIÉPÍTÉSE

Kísérleteimet 2017 nyarán az egyetem műszaki bázisán (Mosonmagyaróvár, Feketeerdei út) végeztem. Ezt megelőzően 2016-ban ugyanitt előkészítő kísérleteket is csináltam. Leteszteltem a berendezést a korábbi pályázat során alkalmazott szenzorrendezés

fokozatos kiépítése mellett (22. ábra). Kísérleteimet *Chlorella Vulgaris* (116-jelű törzs) algákkal végeztem, az általam kiépített 14 liter űrtartalmú **PBR**-ben. A pályázatban használt **PBR** térfogatát kiegészítettem egy tágulási tartállyal (23. és 25. ábrák), ezáltal a felső vízszintes csőszakasz teljes keresztmetszetében feltölthetővé vált.



22. ábra Az átmenő és a szórt fényáram mérése

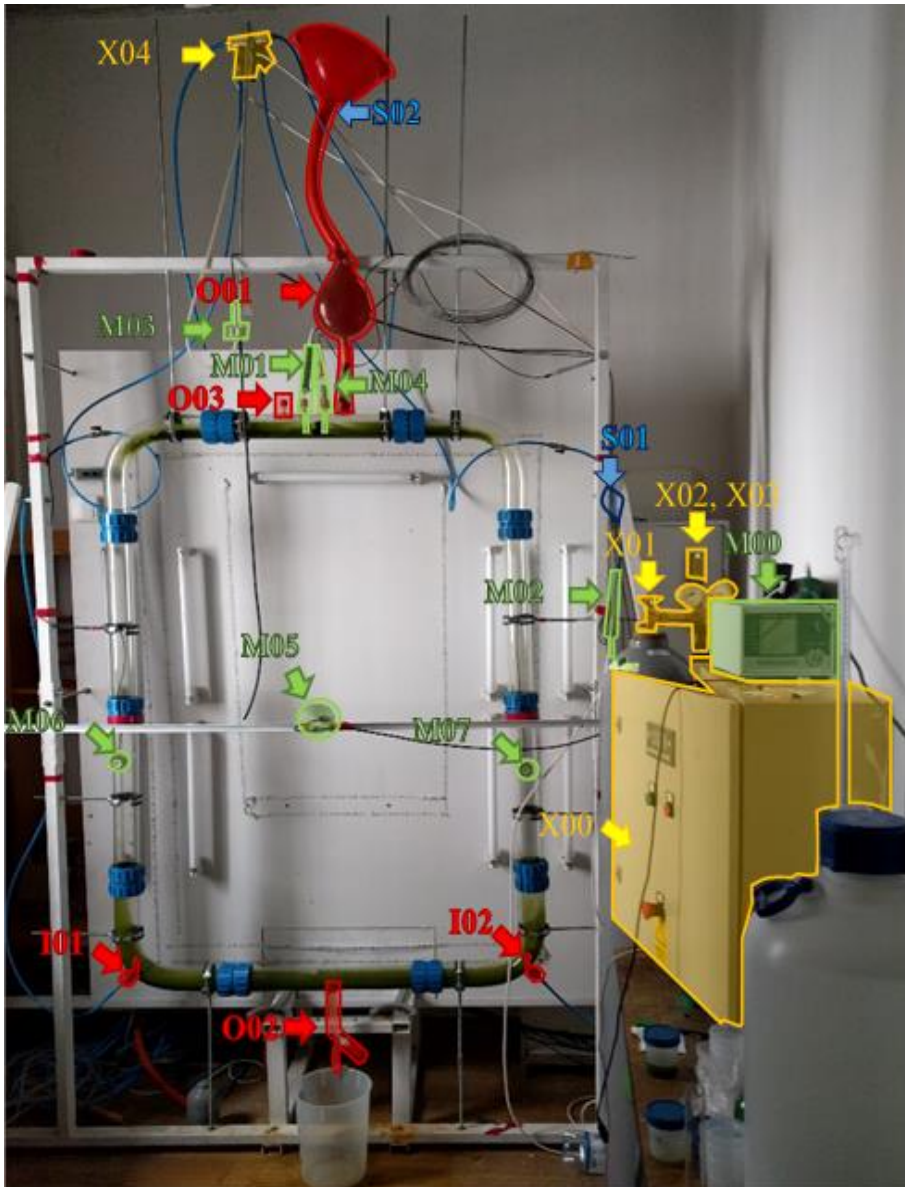
Forrás: saját

Az algaáramlást a meghajtó gáz által előidézett buborékoszlop biztosította. A beáramoltatott gáz összetételét a PLC vezérelte. Az éjszakai ciklusban levegőt, a nappali ciklusban CO₂ és levegő keverékét juttatta a rendszerbe. A két napszak (nappal és éjszaka) hossza egyaránt 12 órán át tartott. A kísérlet idejére teljesen lesötétített helyiségben a nappali megvilágítást fénycső és LED fényforrás kombinációja biztosította. A **PBR** felső mérési pontján, a vízhőmérséklet, a pH és az algakoncentráció, az oldalágban pedig az átmenő és a szórt fényáram (23. ábra) mérése történt. Az alagaszuszpenzió hőmérsékletét a külső időjárás befolyásolta, annak függvényében 14-35 °C között mozgott. A 21 °C alatti hőmérséklet a szeptember közepi lehűlésnek volt köszönhető, amelyet fűtés segítségével 27 °C-ra sikerült felemelnem.

1.2. ALGA-TENYÉSZTŐKÖR ÁTÉPÍTÉSE

Az első kísérleti sorozatot követően kísérleteimet épületen belül másik, de kisebb (5 m²), a korábbi talajelőkészítő helyiségben folytathattam. Ez a költözés módot adott a szenzorok elrendezésének a kísérlet céljából előnyösebb elhelyezésére a **PBR**-ben. A helyiség előnyt jelentett a hőmérséklet szabályozásában is, mert biztosított lett a 24-33°C közötti állapot.

A hosszú több hónapos folyamatos üzemközbeni alga-letapadások minimalizálása érdekében, az „O” gyűrű mindkét szárába kialakítottam gázbefúvási pontokat ($I01$, $I02$), amellyel lehetőséget biztosítottam az algaszuszpenzió váltott irányú áramoltatásra. A korábbi leeresztőcsapot pedig egy hatékonyabb, az alga ülepedésén alapuló szeparációra is alkalmas leeresztő csonkra ($O02$) cseréltem ki. (A változások a **23 ábrán** láthatók).



23. ábra Tovább fejlesztett „O” alakú elrendezés

Forrás: saját

Az újonnan kialakított *szervezet* részletes magyarázata (23. ábra):

beavatkozó szervek: *sárga* szín és *X* betű

X00: vezérlő PLC; *X01*: CO₂ gázreduktor; *X02* és *X03*: rotaméteres áramlásszabályzók (levegőtáp és CO₂); *X04*: útválasztó szelep;

ki és beáramlási pontok: *piros* szín és *I* illetve *O* betű

I01: bal oldali fűvóka; *I02*: jobb oldali fűvóka; *O01*: levegőkiáramlási pont tágulási tartállyal; *O02*: leeresztőcsonk előtétülepítővel; *O03*: pillanat mintavevő csonk;

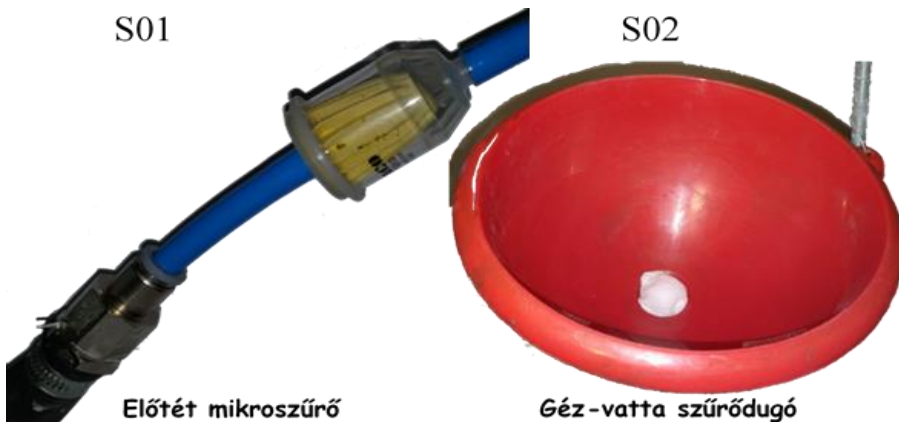
adatgyűjtő és érzékelő berendezések: *zöld* szín és *M* betű

M00: mérési adatgyűjtő (Almemo 5690); *M01*: vízhőmérő (Almemo ZA 930-FS1); *M02*: léghőmérő (Almemo ZA 930-FS1); *M03*: nyomásmérő (Almemo FDA 602 S2K); *M04*: pH mérő (Almemo FY96PHEN); *M05*: globál sugárzásmérő (Almemo FLA6113-GS); *M06*: jobb oldali fényárammérő (Almemo FLA603-RW4); *M07*: bal oldali fényárammérő; (Almemo FLA603-RW4)

szűrők: *kék* szín és *S* betű;

S01: levegőelegy előszűrő; *S02*: kiáramló levegő szűrő.

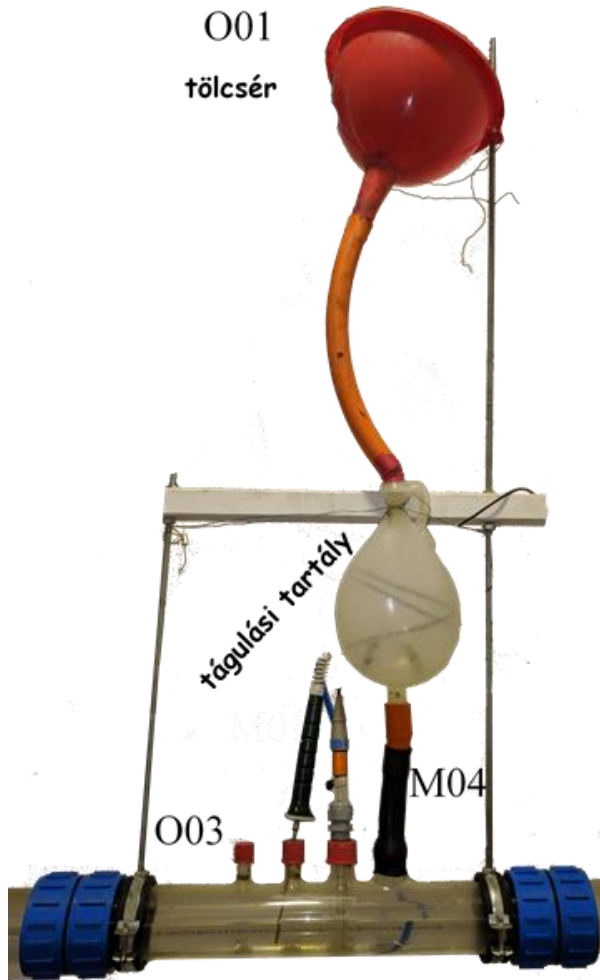
A kísérlet *sterilitásának* biztosítása érdekében további eszközöket is beépítettem a rendszerbe: levegő előszűréshez vattadugóval kiegészített mikrofiltert (24. ábra *S01*), a levegő kiáramlási, illetve az alga zagy utántöltési ponthoz, gézlapba burkolt vatta szűrődugót (24. ábra *S02*).



24. ábra Szűrőbetétek

Forrás: saját

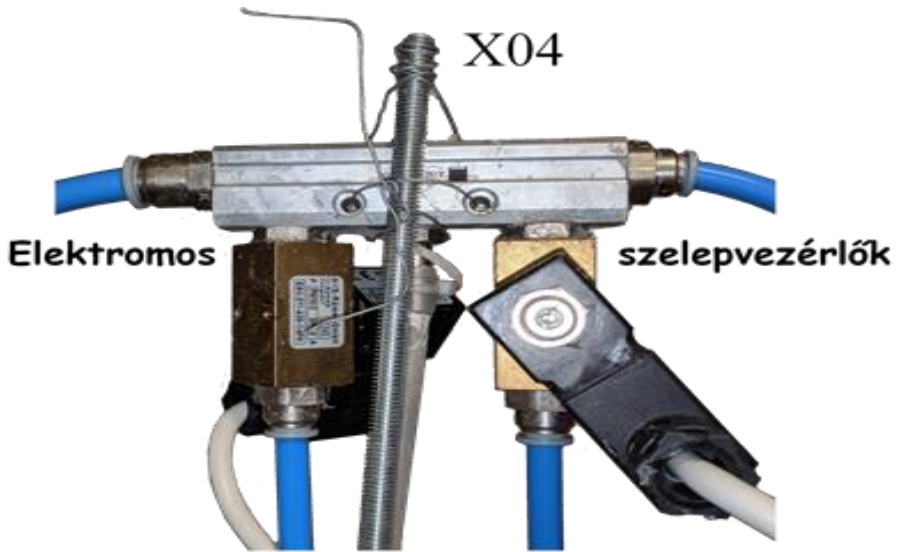
A kiáramló levegőtörlet okozta *algaszuszpenzió távozását* meg kívántam szüntetni, ezért tágulási tartállyal és egy a folyadék utántöltést segítő tölcserrel (25. ábra) bővítettem a rendszert.



25. ábra Kivezető csonek tágulási tartállyal

Forrás: saját

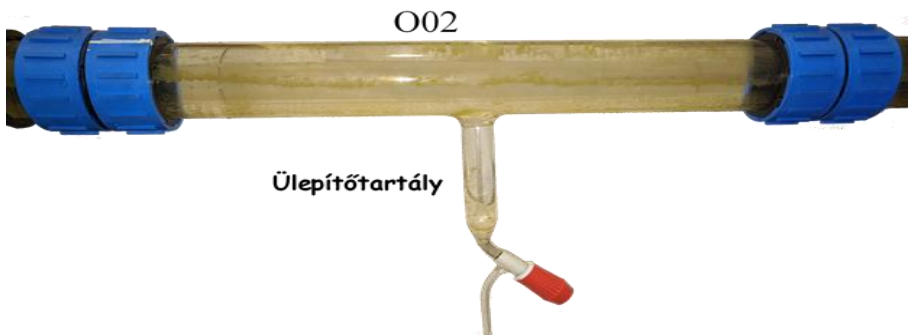
A kétoldali levegőbefecskendezés megvalósításához szükségessé vált a *pneumatikus ellátó rendszer* módosítása is. Ekkor került bele egy elágazás, amellyel szabályozható a levegő útja a jobboldali vagy a baloldali szelephez. (26. ábra). A szeleprendszer vezérlést úgy alakítottam ki, hogy a PLC-vel és manuálisan, vagy mindkettővel egyidőben is vezérelhető legyen bármelyik ágba a levegő befúvása. Az átépítés során a levegővesztességek minimalizálására törekedtem. Megerősítettem a csőcsatlakozások szigetelését, ennek következtében a rendszeren belüli nyomás megemelkedett, ami biztosította a kibővített csőhálózat nyomásszükségletét.



26. ábra Levegőelosztás egységei

Forrás: saját

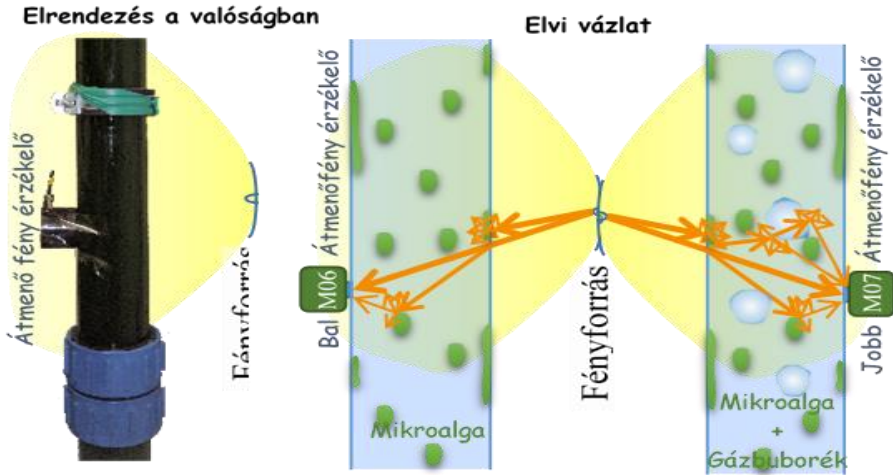
A mindkét oldalra beépített levegőfúvóka szükségessé tette a *leeresztő csonek* áthelyezését. Ennek kiváltására készült el az egyenes szakaszba beépített csőcsonek, ami által az alga ülepedése során kialakuló szeparáció is hatékonyabbá vált. (27. ábra). Ennek a megoldásnak további előnye még, hogy a folyadék bizonyos időszakokban, tisztítás céljából teljes mértékben leereszthetővé vált, tekintettel a leeresztő nyílás elhelyezésére, mert ez a **PBR** legmélyebb pontjára került.



27. ábra Ülepítőtartályos, leeresztő csonek

Forrás: saját

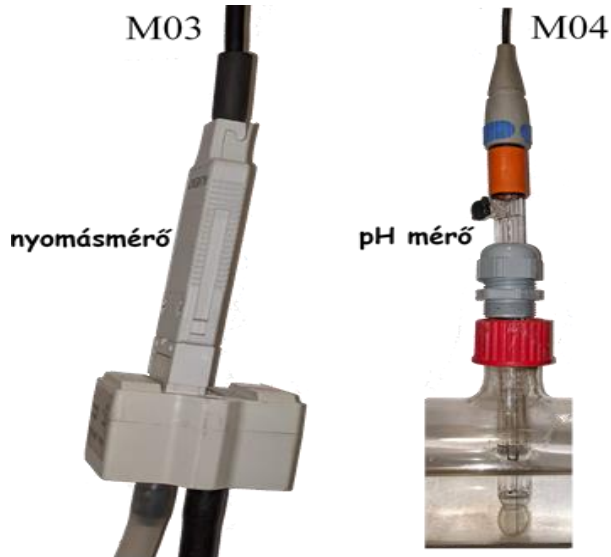
A *szenzorok áthelyezésével* megoldódott mindkét függőleges ágban az átmenő fényáram erősségének mérése. A felszálló ágban a buborékok fényszórásának hatása elhanyagolható (28. ábra).



28. ábra Kétoldal átmenő fényáram mérés

Forrás: saját

Ebbe az új rendszerbe, folyadék hőmérőn kívül, beépítésre kerültek még a levegő hőmérsékletét, a pH-t és a gáz nyomást mérő szenzorok is (29 ábra).



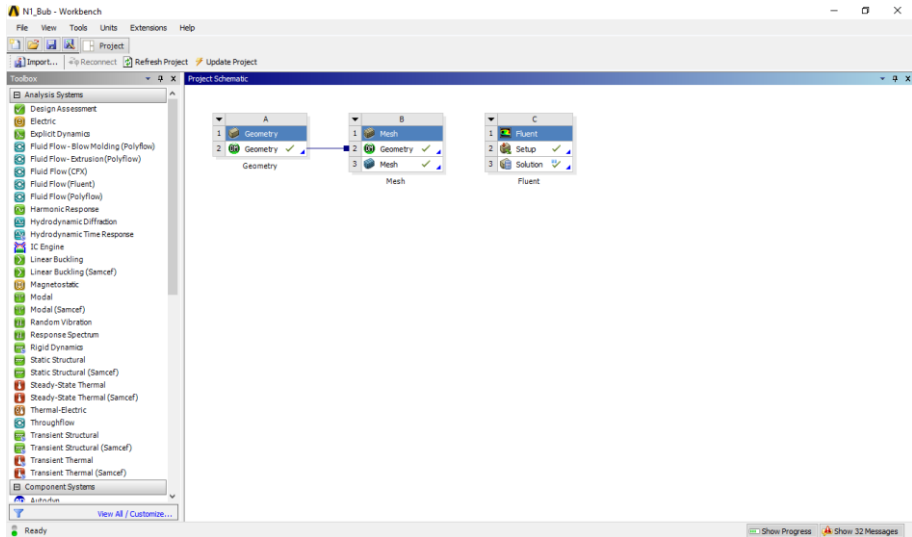
29. ábra pH és nyomásmérő

Forrás: saját

A pályázatban használt globális sugárzásmérőt kísérleteim során csak az utolsó vizsgálati fázisban alkalmaztam, építettem be a rendszerbe.

2. CFD MODELL

A folyadékdinamikai modellek elkészítéséhez a BME társtanszékével közösen vásároltunk (GOP pályázat keretében) egy a *ANSYS 14,5 FLUENT* licencet. Az ehhez csatolt szupport szolgáltatással, elkészítettük az „O” elrendezés modelljét. Először létrehoztunk egy *FLUENT* projektet az *ANSYS* projektkezelőjében a *WORKBENCH*-ben (30. ábra).



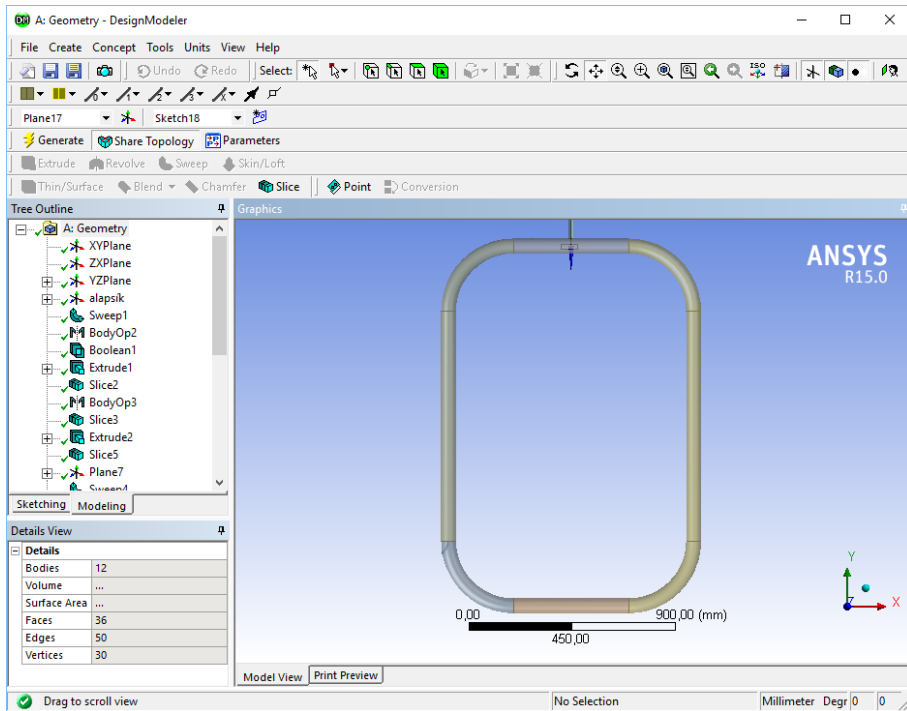
30. ábra Az ANSYS WORKBENCH, projekt kezelőfelülete

Forrás: saját

Az alkalmazott FLUENT projekt 3 fő részből áll: *geometria* (30. ábra „A”), *hálózó* (30. ábra „B”) és *megoldó* (30. ábra „C”) modul.

2.1. 3D MODELL

A CAD rendszerből beimportálható geometriai modellekbe a peremfeltételek és a hálózás beépítése igen bonyolult, ezért az *ANSYS* rendszerbe beépített *DESIGN MODELLER* szerkesztőfelületet alkalmaztuk, melyben az alapelemekből összeállítottuk a modellstruktúrát (31. ábra).



31. ábra ANSYS DESIGN MODELLER kezelőfelülete

Forrás: saját

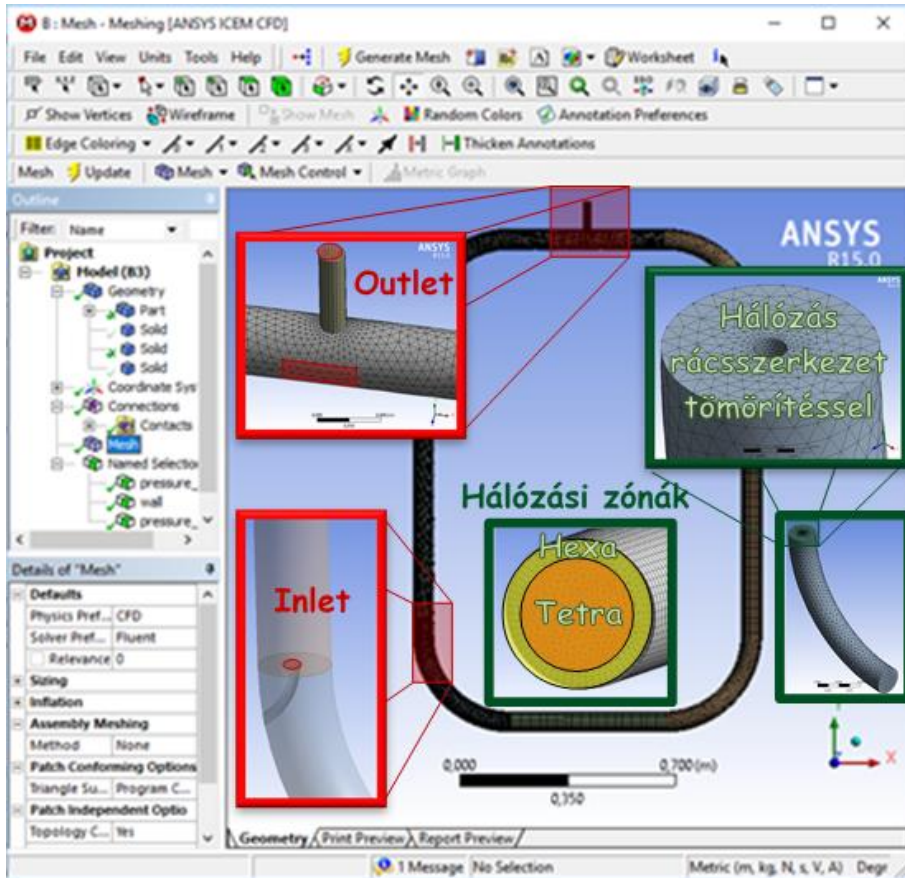
Az első geometriai változtatás esetünkben a szakaszhatárolás volt, ami vágással történt. A vágással megszakított, de az azonos hálózási struktúrával rendelkező részeket a hálózási műveletet megelőzően össze kellett kapcsolni.

A második geometriai változtatás az inverz csőcsomk beillesztése és annak végére a beáramlási pont (**INLET**) berajzolása volt. Fontos megjegyezni, hogy több, összetettebb beáramlási pontot tapasztalataink szerint úgy lehet kialakítani, ha kiképezünk egy osztócsatornát.

A harmadik szükségszerű változtatás pedig a kiáramlási pont (**OUTLET**) elkészítése volt, ami az eddigiekhez képest más technikával történt. Esetünkben ez azt jelentette, hogy a hálózási műveletet követően a felület megnyitására, a már behálózott felületen lettek kijelölve a szükséges rácspontok.

2.2. HÁLÓZÁS (MASHING)

A hálózás során kellett kijelölni a határfelületeket (*WALL*) és a korábban már említett *INLET* valamint *OUTLET* zónákat. Az egyes szakaszok hálózásánál be kellett állítani a megfelelő hálózási formát (ami lehet: *TETRA*, *HEXA* stb.) és a falmenti kritikus szűkület közeli hálósűrítést. (32. ábra)



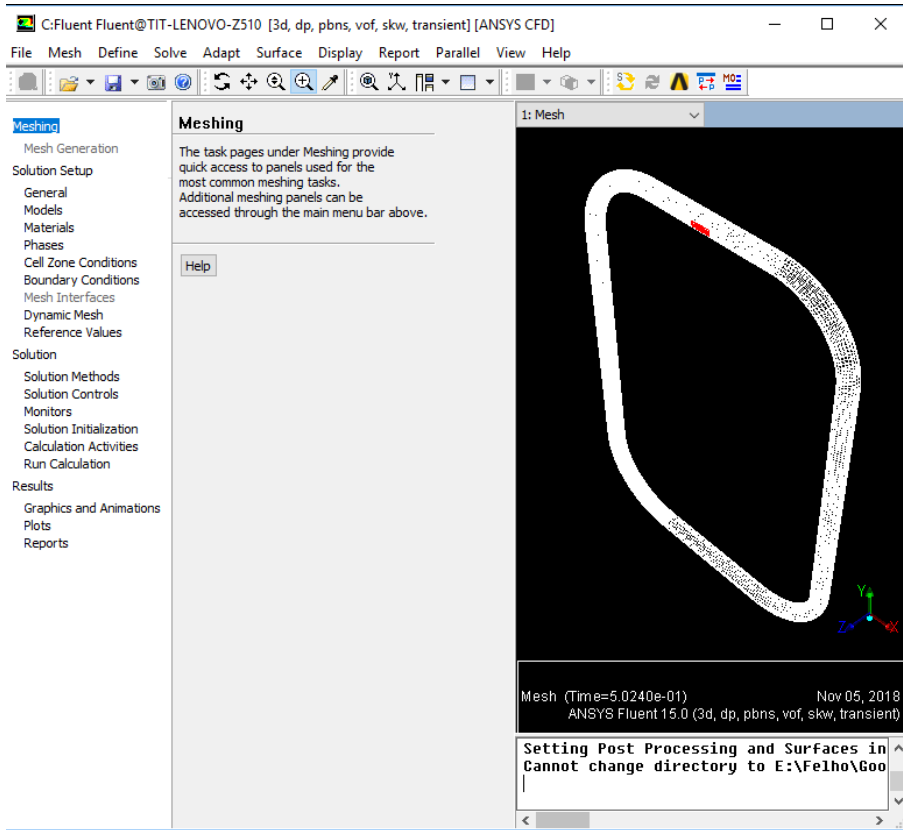
32. ábra A Háló (Mesh) modell

Forrás: saját

Fontos még a hálótorzulás (*SKEWNESS*) mértékének csökkentése is, figyelemmel arra, hogy az nagyban befolyásolja a *SOLVER* működését. A számunkra kedvező *SKEWNESS* statisztika elérésére több lehetőség adott, melyek közül mi a hálósűrítés finomhangolását választottuk, szükségtelen volt háló pontokat törölni, esetleg átmozgatni.

2.3. FLUENT SOLVER

A *FLUENT* megoldó paraméterezését – a szuszpenzió áramlási viszonyainak vizsgálatához – saját elképzeléseim szerint végeztem. A választás során a modell (*Mixture* és *VOF*) megfelelő paramétereit, anyag és fázis jellemzőit, a peremfeltételeket, a futási paramétereiket, valamint az eredmények megjelenítésének formáját kellett kiválasztanom. (33. ábra)



33. ábra ANSYS FLUENT

Forrás: saját

Az *ANSYS FLUENT* menüpontjaiban mindkét modellel (*Mixture* és *VOF*) tekintettel a következő beállításokat végeztem (a modellekre vonatkozó részletes beállítási lehetőségek **II. Melléklet**-ben olvashatók):

- [1] *Meshing*: Hálózás

Hálózással kapcsolatos beállítások (esetemben nem volt szükség a használatára).

- [2] *Solution setup*: Megoldó beállításai

- [2/1] *General*: Általános beállítások

Nyomás bázist abszolút sebesség vektort és függő időt, valamint a gravitáció paramétereit adtam meg.

- [2/2] *Models*: Modellek

Az alkalmazott modellek főbb paramétereit itt kerülnek beállításra.

- [2/2↓1] *Multiphase models*: Multifázis Modellek

Két **Eulerian** fázist állítottam be, **Mixture** modellnél a sebességcsúsztatást engedélyeztem, **VOF** modell estében nyílt sémát alkalmaztam, továbbá be kellett állítanom egy maradéktérfogat minimum és aktuális értéket.

- [2/2↓1] *Viscous Model*: Viszkózus Modell

A **Mixture** modell esetében realiztikus **k-ε** turbulencia modellt alkalmaztam egyensúly mentes falközeli régió kezeléssel alkalmaztam. A **VOF** modell estében **k-ω** turbulencia modellt, nyíró áram korrekcióval, működési korlátozással alkalmaztam.

- [2/3] *Materials*: Anyagok

Folyadék fázisban, H₂O, CO₂, Szilárd fázisban alumínium (helyettesítve az üveget) anyagokat alkalmaztam.

- [2/4] *Phases*: Fázisok

Elsődleges fázis H₂O és másodlagos fázis CO₂.

- [2/5] *Cell Zone Conditions*: Cellakörnyezeti beállítások

A **Mixture** modell beállítás a szilárd fázishatár környezetének viselkedésre.

- [2/6] *Boundary Conditions*: Peremfeltételek

Bemenő (**INLET**) feltételnek sebességet, valamint Turbulencia intenzitást, viszkozitási aránytát határoztam meg. A Kimenő (**OUTLET**) feltételek túlnyomást, valamint Turbulencia visszaáramlás intenzitást, Turbulencia visszaáramlás viszkozitási aránytát, állítottam be. Falnak, csúszásmentes stacionárius falnyírást megfelelő felületi érdesség mellett adtam meg. Végül üzemeltetési beállításaként, automatikusan a korábbi paraméterezésnek köszönhetően automatikusan beállításra került a nyomás és gravitáció.

- [2/7] *Reference Values*: Referencia értékek

A korábban megadott, anyagok, fázisok, és a hozzájuk tartozó peremfeltételek összefoglalva elérhetőek.

- [3] *Solution*: Megoldó

A **Mixture** modellnél lépés alapot, a **VOF**-nél már időalapot használtam.

- [3/1] *Solution Methods*: Megoldási módszerek

A **Mixture** Modell esetén SIMPLE, a **VOF** Modell esetén PISO sémát alkalmaztam.

- [3/2] *Solution Controls*: Megoldó szabályzók

Az alkalmazott modellek főbb paramétereit itt kerülnek beállításra: (Nyomás, Sűrűség, Erő, Elmozdulás, Turbulens kinetikus energia, Turbulens viszkozitás)

- [3/3] *Monitors*: Megfigyelők

Adatfelvételezési gyakoriság beállítása.

- [3/4] *Solution Initialization*: Kezdeti érték beállítása

Relatív cellazónákat minimum értékre kell beállítani.

- [3/5] *Calculation Activities*: Számítások közbeni tevékenységek

Például eredménynaplózás beállítása

- [3/6] *Run Calculation*: Futtatási beállítások

Itt kell beállítani a számítási gyakoriságot, egy iteráción belüli maximális lépésszámot, a riport készítési gyakoriságot, profil frissítést. Továbbá itt lehet elindítani magát a futtatást is

- [4] *Results*: Eredmények megjelenítése

Dolgozatomban a **Mixture** esetében sebesség színes grafikus megjelenítést használtam, de kipróbáltam a vektorábrát is, **VOF** esetében a Fázishatár megjelenítő használata volt a megfelelő (Lépés vagy Idő alap).

3. ALGATENYÉSZTÉS ÉS A MÉRÉSEK KIVITELEZÉSE

A berendezésben levő algaszuszpenzióból az előzetesen megtervezett időpontokban mintát vettem és/vagy szüreteltem is. A **PBR** első változatával végzett mérések mintavételi időpontjait (2017. évi) a **IV.a melléklet**, a **PBR** módosított változatával végzett mérések mintavételi időpontjait (2018. évi) **IV.b melléklet** tartalmazza. A kivett mintákból információt nyertem az áramlásban és az üledékben lévő alga koncentrációjáról. Szükség esetén szüreteltem.

A mintavétel egy mintavételi időben, kétféle módon történt, *pipettával* erre a célra kialakított felső mintavételi nyíláson (**26. ábra O03**, jelölése **F(ts)** liter értékkel kiegészítve) a főáramból, és *leeresztéssel* a leeresztő csonkon keresztül (**28. ábra O02**, jelölése **Cs**).

A szükséges szüretelést megelőzően mindenkor vettem mintát az üledék vizsgálatára. A szüretelést (1-3 liter) követően a tápoldattal (BRISTOL, **V. melléklet**) újra feltöltött rendszerből ismét vettem mintát az állománynövekedés szüretelés előtti és utáni állapotának elemzésére.

A minták koncentrációját spektrofotométerrel mértem és időközönként szárazanyag méréssel validáltam.

A fényforrásból érkező szórt vagy átmenő, illetve globális fényintenzitásokat, a pH-t, az oldat és levegő hőmérsékletét, a betáplált gáz nyomását folyamatosan ALMEMO mérésadatgyűjtővel regisztráltam.

A levegő hőmérséklete 20 és 31 °C között változott, ami nagy hőingadozás, de a méréseimet, vizsgálataimat jelentősen nem befolyásolta. Állításomat a szakirodalomban található „Alganövekedés különböző hőmérsékletek mellett” című **4. ábra** igazolja.

A mintákból az optikai vizsgálatokhoz 2 ml szuszpenziót használtam fel, melyet a spektrofotométer küvettájába töltöttem és szükség szerint $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{32}$...arányban hígítottam. Amennyiben hígításra került sor, a pontosság, illetve a későbbi, kalibráció érdekében állítható automata (BOECO 100-1000 µl Mikropipetta) pipettával dolgoztam.

4. ALGAKONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁS

4.1. SZÁRAZANYAG MEGHATÁROZÁS

A mikroalgák szárazanyag meghatározására elfogadott módszer alapján (Ördög 2014), a mérendő algaszuszpenziót egy 2 µm-es szűrőpapíron megsűrítik és szárítás után meghatározzák a szűrőn maradt algasejtek tömegét. A mérésnél azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni a szűrőpapíron átjutó kisméretű algák miatti veszteséget és nem utolsósorban a szűrőpapír magas árát. Ezért végeztem az algakoncentráció gravimetriás meghatározását (MSZ-08 0205-78 1978) a következők szerint.

A szárazanyag gravimetriás meghatározásához legkevesebb 20 cm³, de lehetőség szerint több mint 40 cm³ szuszpenziót, vagy centrifugált koncentrátumot használtam. A minták beszárításakor 80 C°-on 48 órás hőkezelést alkalmaztam, majd az edényt légmentesen lezárva negyedórát hűtöttem mielőtt visszamérem az analitikai mérlegen. Hűtésnél a visszanedvedés elkerülése érdekében az exikátorban történő visszahűtés helyett 120 C°-ig hőkezelhető 100 cm³ térfogatú, légmentesen zárható tetejű edényeket használtam (34. ábra). Ezzel a módszerrel gyorsabb, hatékonyabb, és főleg precízebb mérést tudtam végezni.



34. ábra „Hőálló” (max: 120°C) tárolóedény

Forrás: saját

A fenti módon történő szárazanyag mérés előtt a koncentráció növelését, illetve az algaszuszpenzió térfogatának csökkentését centrifugálással végeztem. Erre a célra - szükség szerint több menetben - HETTICH Universal 32R típusú laboratóriumi centrifugát használtam (egy menetben a 4 x 150 cm³ oldatot 4000 1/perces fordulatszámom), így akár század részére is tudtam sűríteni a szuszpenziót.

Amikor az algakoncentrációt szárazanyag mérésel határoztam meg, az oldatban levő algától különböző anyagok mennyiségét figyelmen kívül hagytam. Ilyen irányú korrekciót azért nem alkalmaztam, mert a BRISTOL tápoldatban levő anyag száraztömege (Wg) elenyésző mennyiségű az algatömeghez képest.

4.2. HIPERSPEKTRÁLIS MÉRÉS

Az Optikai módszerekkel elsősorban az algaszuszpenzió fényáteresztő képessége révén a fényhasznosító molekulák mennyiségét lehet vizsgálni. A küvetába előkészített algaszuszpenziót tartalmazó folyadékmintát az Élelmiszeripari labor Hitachi U-2910 Spektrofotométerével vizsgáltam, a spektrális üzemmód három féle mérési beállításában:

1. Teljes tartomány: 190-1100 nm között, spektrális felbontás: 1 nm
2. Szűkített felső tartomány: 550-750nm között, spektrális felbontás: 0,5 nm (chlorophyll „a” -ra jellemző csúcs)
3. Szűkített alsó tartomány: 350-550 nm között, spektrális felbontás: 0,5 nm (β -carotene-ra jellemző csúcs).

Minden oldat spektrumát 3 ismétlésben vettem fel. Tekintettel arra, hogy a műszer a spektrum minden pontját 10 adat mérésével és azok átlagolásával adja meg, ez 30-szoros ismétlést jelentett, így jutottam koherens, gépi zajtól mentesített szűrt adatokhoz.

4.3. OPTIKAI ONLINE MÉRÉS

A **PBR** 2017-es változatában – az algakoncentráció folyamatos mérése érdekében – csak a baloldali ágban voltak fényárammérő szenzorok elhelyezve (**23. ábra**), amelyek mérték az átmenő és szórt fényáram mennyiségét.

A **PBR** 2018-as átépített változatának – az algakoncentráció folyamatos mérése érdekében – mindkét ágába került fényárammérő szenzor (**28. ábra**), ezek biztosították az átmenő fényáram mérhetőségét.

5. ADAT FELDOLGOZÁSI MÓDSZEREK

A mérési adatok feldolgozását WINDOWS 10 operációs rendszerben, OFFICE 360 Excel programjával végeztem. Ebben a programban történt az adatok rendezése, a regressziós számítások és a szemléltető ábrák szerkesztése.

A szimulációs modellel való számításokat az ANSYS 14.5 FLUENT moduljával végeztem.

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

1. ÁRAMLÁSI VISZONYOK

A hatékony algatermesztő **PBR** működtetésének alapvető feltétele a megfelelő áramlási viszonyok biztosítása, ennek elérése érdekében a következő szempontok szerint jártam el:

1. az elkeveredés és az elnyelődés céljából a fúvókából érkező széndioxid levegő keverék mennyiségét optimális mértékűre állítottam.



A számításokat és méréseket a **2. táblázatban** szemléltetem,

2. a fotoszintetizálást gátló tényezők minimalizálására turbulenssé tettem az áramlást. Szükségessé vált, hogy a viszonylag vastag (átmérő 65 mm) reaktorcső tengelyvonala közelében áramló algák – ahol holt zóna alakulhatna ki – megfelelő mértékben fényhez jussanak, megelőzve ezzel a részleges elhalásukat.
3. Az algakerakódás csökkentésére megváltoztattam a **PBR** geometriáját.

Az átépítéskor fokozott figyelmet fordítottam arra, hogy a fal közelében az áramlás túlzott mértékben ne lassuljon le, ne keletkezzen algakerakódás.

Ahhoz, hogy a rendelkezéseimre álló **PBR** az általam megfogalmazott szempontoknak megfeleljen, ismernem kellett a létező áramlási viszonyokat. Az áramlási viszonyok tisztázására az *ANSYS FLUENT* program környezetben készítettem egy virtuális modellt, lásd **32. ábra**. A modell készítésekor az input adatokat az előzetes felmérésekből és számításokból nyertem (**2. táblázat**). Megfigyeltem az áramlásba helyezett testek mozgását. Ezzel mértem az áramlás átlagos sebességét, ami a szimuláció előkészítéshez elegendő, de jóval pontosabb az áramlást meg nem zavaró költséges ultrahangos, optikai, vagy röntgen áramlás mérőknél (Kristóf 2013).

2. táblázat Különböző fűvókák összehasonlítás

IN-1 A=3.14mm ²		IN-2 A=1.57mm ²	
$Q = 10 \frac{l}{min}$	$Q = 4 \frac{l}{min}$	$Q = 9 \frac{l}{min}$	$Q = 4 \frac{l}{min}$
$v_{Gas} = 53,2 \frac{m}{s}$	$v_{Gas} = 21,3 \frac{m}{s}$	$v_{Gas} = 95,7 \frac{m}{s}$	$v_{Gas} = 42,5 \frac{m}{s}$
$v_{Water} \approx 1,2 \frac{m}{s}$	$v_{Water} \approx 0,39 \frac{m}{s}$	$v_{Water} \approx 1,1 \frac{m}{s}$	$v_{Water} \approx 0,4 \frac{m}{s}$

Forrás: saját

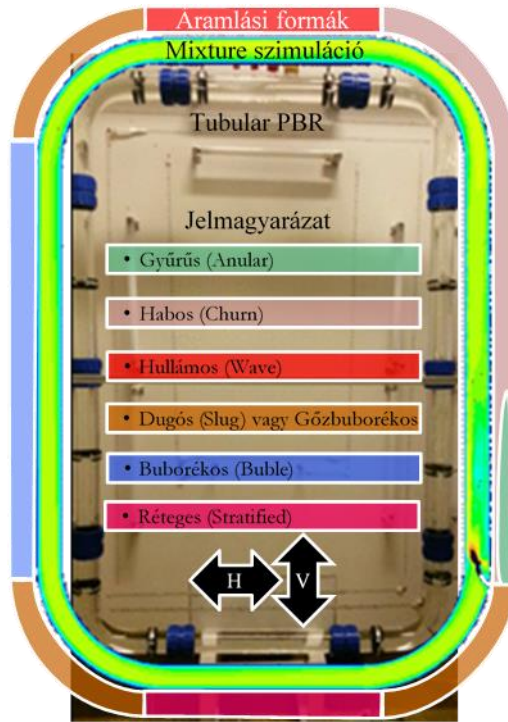
A megfelelő gázáram, keverőhatás előidézése érdekében a **PBR**-tervezésénél, többféle fűvókamegoldással és különböző bemenő légáram mennyiséggel kísérleteztem. Azt tapasztaltam, hogy a fűvókák nagy bemeneti légáram esetén is jól teljesítettek:

- a nagy sebességkülönbség ellenére a nyíróhatás minimális volt, az algasejtek épek maradtak,
- a keverőhatás megfelelő volt, mind a fénymennyiség mind a gázcsera szempontjából,
- a fali algaletapadás kezelhetővé **vált**, minimális mértékűre csökkent.

A modell futtatását a FLUENT-ben egy egyszerűbb **Mixture**, majd később a nagy számítási kapacitást igénylő **VOF** megoldó algoritmussal is elvégeztem. Ezek a modellek, a hirtelen nagy sebességugrásokra nagyon érzékenyek. Ilyen kritikus helyek, a falközeli régiók, be- illetve kiáramlási pontok (a fűvókák, mint szűk helyek), kanyarok, ahol célszerű sűrített tetraédes hálót alkalmazni. Mindemellett azt is szem előtt kellett tartani, hogy ez a hálótípus a sebességvektorokat torzítja, aminek a következménye a valóságtól eltérő áramlási struktúra. A *fűvókák* környezetében – azok mérete, és a megnövekedett áramlási sebesség okán – nagyobb mértékű hálósűrítésre volt szükség, azért, hogy elkerüljük a hálótorzulás okozta számítási hibákat. A lapított fűvóka szimulációjánál külön kihívást jelentett a kialakult osztott beáramlási csatorna kezelése, mert a FLUENT csak egy bemenetet engedett használni. Ennek a problémának a feloldására kétféleképpen közelítettem meg:

- a beáramlási csatornák réssel történő összenyitásával,
- a két beáramlási pont elé, egy osztó csatornával rendelkező osztatlan beáramlási pont kiépítésével.

Amikor a *valóságos áramlással* összevetjük a **Mixture** szimulációt a elmondhatjuk, hogy a főbb áramlási formák (Corneliussen és mtsai. 2005) megjelennek a modellben, de elkülönítésük az átlagolás miatt teljes mértékben nem lehetséges (**35. ábra**).



35. ábra Algatermesztő berendezésben és mixture modellben uralkodó áramlási viszonyok összehasonlítása

Forrás: saját

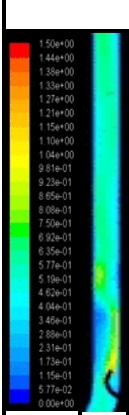
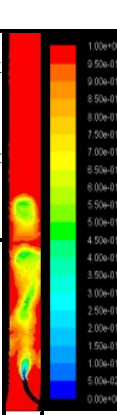
Vizuális megfigyeléssel – melyeket a fenti ábrán szemléltetnek –, az áramlási formákat a következőképpen különítettem el, amikor a:

- a fúvóka környezetében az áramlás *gyűrűs* (zöld),
- a felszálló ágban távolodva a fúvókától *habos* (barna) válik,
- a felül légréteggel rendelkező szabad felszínű *hullámos* (piros) áramlás alakul ki,
- az íves szakaszokban a hirtelen irányváltás okozta turbulencia következtében *dugós* vagy *gőzbuborékos* (barna) áramlás figyelhető meg,
- a lefelé áramlásban *ellenáramú buborékok* (kék) jelennek meg
- a nyugodtabb alsó szakaszra a *réteges* (lila) áramlás a jellemző.

A folyamatok pontosabb meghatározása érdekében – mivel a **Mixture** szimulációval nem kaptunk reális képet – az elkészült virtuális modellt lefutattam a **VOF** szimuláció

alkalmazásával is. A **VOF** szimuláció alkalmazásakor figyelembe kellett venni a megnövekedett számítási igényt. A kiáramlási pont környezetét vizsgálva 0,74 másodperc időtartamban szimuláltam, de ez is közel két hét futtatási időt igényelt. Megállapításaimat az ebben az időszakban történt változások összehasonlítása alapján tettem meg. A két szimulációs modellösszevetését a **3. táblázat** tartalmazza.

3. táblázat *Mixture* és a *VOF* modell összehasonlítása

Modell	
Mixture	VOF
 <p>- Biztosított a helyi homogén áramlás</p>	 <p>- Elkülönült áramlások elemzésére alkalmas, - Amikor fontos a felület pontos formája</p>
Átlag	Fázis
<p>←Sebesség→ (Velocity)</p> <p>~180s ~10.000step</p>	<p>~0,74s ~625.000step</p>
<p>←Szimulációs idő→</p>	

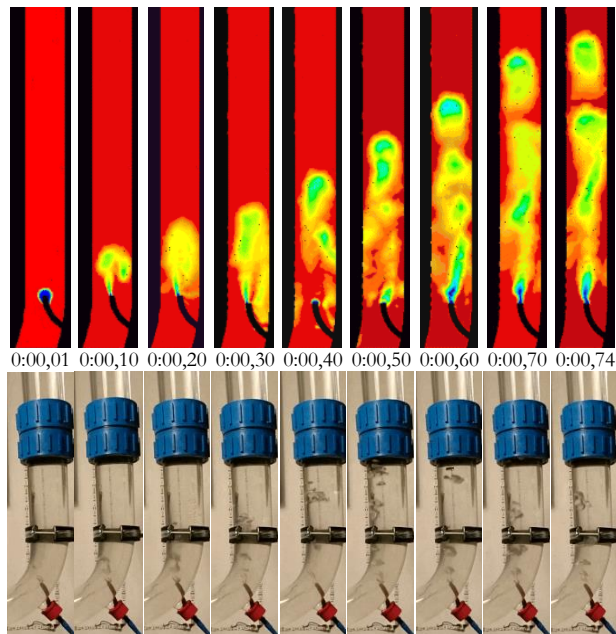
Forrás: saját

Az összehasonlításokból az alábbi következtetéseket tudtam levonni:

A **Mixture** egy leegyszerűsített modell, amely a közeget egy egységként kezeli, ezért a mozgási trendeket könnyen le lehet róla olvasni, beleértve a turbulencia valószínűsíthető helyét is. A futtatás lépés alapon történt, minden 25. lépésről készült pillanatkép. Az egyenletrendszer konvergenciájának eléréséhez közel 10.000 lépésre volt szükség, ami több mint 3 óra futtatási időt jelentett. A kapott átlagos sebességadatokkal pontatlan képet kapunk az egyes fázisok valóságos áramlásáról.

A **VOF** modell esetében pontos áramlási képet kapunk, de ehhez jelentősen több számításra van szükség (625.000 lépés) a **Mixture** modellhez képest. A nagyobb számítási igény miatt mindösszesen 0.74 másodperc buborékmozgás szimulációját futtattam le a **VOF** modellben és nem a függvények konvergenciájának eléréséhez szükséges lépésszámot. Ekkor a számolás már időalapon történt, az 1 századmásodperces pillanatkép elkészítéséhez 8.340 lépésre és 3 óra futási időre volt szükség. Próbáltam a multiprocesszoros üzemmódot is, de az instabilnak bizonyult, mivel pontos ismeret hiányában a processzorok számítási feladat határai nem álltak rendelkezésemre.

A szuszpenzió áramlás pontos folyamatait mérni képes neutron sugárzással működő áramlásmérő szonda a kísérletemhez nem állt rendelkezésemre, ezért más kutatók (Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007) példáját követtem. Az előzetesen meghatározott kiindulási adatokkal futtatott **VOF** szimulációs modell helyes működését 120 képkocka / másodperces HDR videófelvételek elemzésével tudtam igazolni (**36. ábra**). Mivel az alga szuszpenzió sűrűsége elhanyagolható mértékben tér el a víz sűrűségétől (melyet a konvergenciáig futtatott **Mixture** modell vizsgálata igazolt), az áramlási képet nem befolyásolná, ezért a **VOF** szimulációs modellt a víz sűrűségi adatával futtatva vizsgáltam.



36. ábra Buborékképződés modellezése

Forrás: saját

A tapasztaltakat új tudományos eredményként fogalmazom meg:

*Algatermesztésre alkalmazott PBR-ben vizsgáltam a bejuttatott gázáram által előidézett áramlást. Az áramlást **Mixture** és **VOF** modellekben készített modellekkel szimuláltam. A **VOF** modell segítségével végzett számítások megegyeztek a mérési eredményekkel. A **Mixture** modellel készített számításokban az áramlási formák nem voltak elkülöníthetők, de a turbulencia pontok jól megközelíthetők voltak.*

2. HÍPERSPEKTRÁLIS MÉRÉSEK ÉRTÉKELÉSE

Az alagaszuszpenzió magas pigmenttartalmú mikroalgát – amely (Becker, Sokolichin, és Eigenberger 1994) megállapítása szerint főként klorofilokból és karotinoidokból áll – és az annak táplálására használt BRISTOL tápoldatot tartalmaz. A tápoldat oldott anyag tartalma elenyésző, az optikai mérést nem befolyásolta. Az általam használt gépi beállításban (**VI. Melléklet**), a tanszéki Hitachi spektrofotométerrel mérhető maximális abszorbancia érték 10 abs. A pontos mérés érdekében csak a 3 abs értékig használtam a következők alapján. Amennyiben I a *minta* oldaton, I₀ pedig a *referencia* oldaton áthaladt fény intenzitása, akkor az abszorbancia (A) értéket a következő képlettel számítja a műszer:

$$A = -\lg(T) = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

- Abban az esetben, amikor a műszer A = 10, azaz a maximális abszorbanciát érzékel, akkor a minta elnyelése 1/10¹⁰ részére csökkenti az átjutott fény intenzitását.

$$-\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \quad \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = 10 \quad \frac{I_0}{I} = 10^{10}$$

- Amikor A = 3 abszorbanciát mutat, akkor a minta elnyelése 1/10³ részére csökkenti az átjutott fény intenzitását.

$$-\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 3 \quad \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = 3 \quad \frac{I_0}{I} = 10^3$$

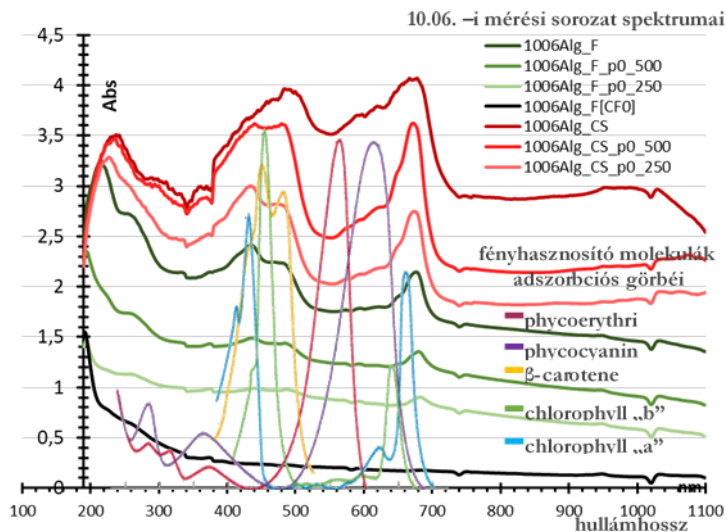
Mivel a műszer pontossága, transzmittancia ($T = \frac{I}{I_0}$) értékre 0,1%, ez éppen az A = 3 abszorbancia értéknek felel meg, ami azt jelenti, hogy a pontos mérés e határérték alatt végezhető el.

Megállapítható, hogy a mért abszorbancia érték (A) a Lambert-Beer törvény értelmében arányos a koncentrációval, azaz a műszer alkalmas az algamennyiségi meghatározásra.

A Hitachi spektrofotométer működése során a spektrum pásztázását a 1100 nm-től 190 nm-ig csökkenő sorrendben regisztrálja az abszorbancia értékeket. Ezért a spektrumok értékeléséhez először növekvő sorrendbe állítottam az abszorbancia értékeket. A spektrofotométer kezelőprogramjában a következő kiértékelést segítő funkciók találhatók:

- amelyek segítenek felderíteni a spektrumban található a műszer által „peak”-nek nevezett csúcsokat és „valley”-nek nevezett völgyeket,
- kiszámolja a csúcs és a hozzá tartozó nagyobb hullámhosszú völgy közötti differenciát, valamint
- a csúcs alatti területet háttérkorrekcióval határozza meg.

Az általam mért abszorbanciákat összehasonlítottam a (Danila és Lucache 2016) által közölt fényhasznosító molekulák abszorpciós görbéivel. Az összehasonlításból jól látható a β -carotene, a *chlorophyll „a”* fényhasznosító molekulák és az általam használt *Chlorella Vulgaris* mikroalga abszorbanciája közötti kapcsolat (37 ábra).



37. ábra A *Chlorella vulgaris* spektruma és a fényhasznosító molekulák abszorpciós görbéjének összehasonlítása

Forrásból átdolgozva: (Danila és Lucache 2016)

Az ábrán látható általam vett „F” (főáramból) és „Cs” (leeresztő csonkból vett üledék) minták a – különböző koncentrációjú *Chlorella vulgaris* algaszuszpenziók abszorbanciája a β -carotene kettős és a *chlorophyll „a”* különálló csúcsainál – 3 abszorbancia értékéig egyre markánsabban növekvő csúcsokat találunk. A 3 abszorbancia érték fölött egy telítődés figyelhető meg, de a műszer hatványozottan növekvő bizonytalansága miatt ennek bizonyítása kétséges. A kutatók között (Griffiths és mtsai. 2011) nincs kialakult konszenzus, mikroalgákban található fényhasznosító molekulák hatása tekintetében. Az általam vizsgált

Chlorella vulgaris jellemzők újabb eredményt mutatnak a β -carotene kettős és a chlorophyll „a” csúcseinak a (400-460 nm és 650-680 nm) vizsgálatokor. A kutatók eltérő eredményeit a **4. táblázatban** szemléltetem.

4. táblázat Mikroalgák, más kutatók által vizsgált Biomasszatömeg meghatározására alkalmas jellemző hullámhosszak

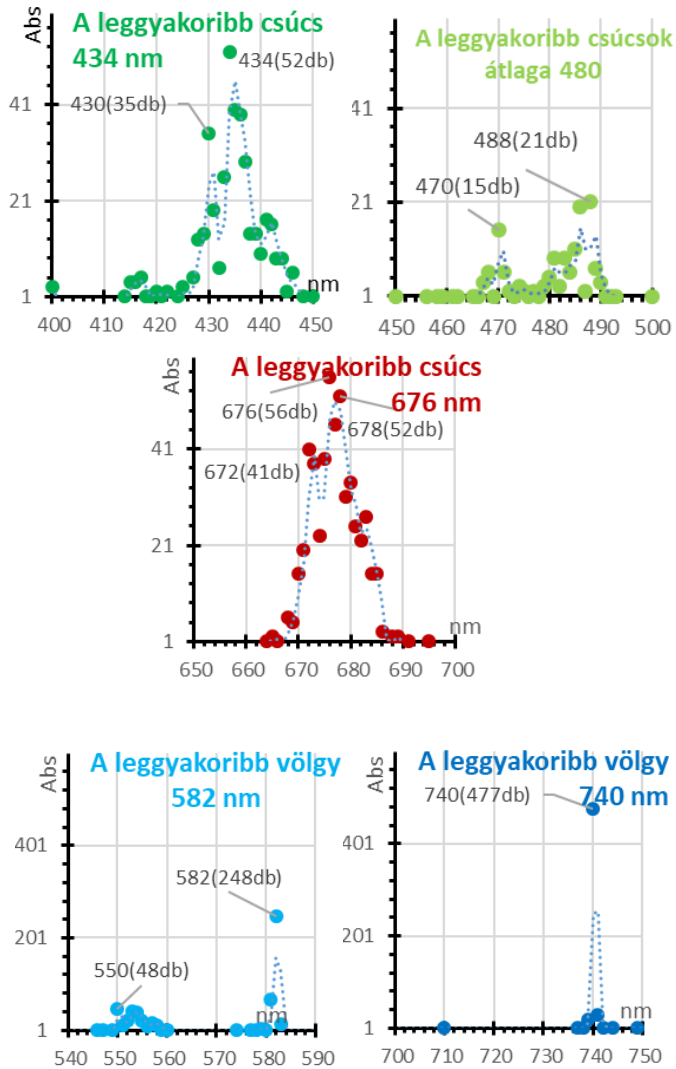
Forrás:

Az

saját

Törzs(ek)	Hullámhossz [nm] (csücs/völgy)	Eredmény	Referenciák
<i>Chlorella vulgaris</i>	684/750; 487-443/	Mikroalgák biomassza koncentrációjának becslése pigmentek optikai sűrűségével	(Griffiths és mtsai. 2011)
<i>Chlorella sp.</i>	682/–0	CO ₂ megkötése nagy sűrűségű mikroalgával szakaszos működtetésű fortobioreaktorban	(Chiu és mtsai. 2009)
<i>Chlorella sp.</i>	682/576	Mikroalgák termesztése olajtermelés céljából, karbamid korlátozási stratégiával	(Hsieh és Wu 2009)
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	450/	Génmódosított Kovamoszatok policiklikus aromás szénhidrogén felvétele	(Bopp és Lettieri 2007)
<i>Scenedesmus obliquus</i> , <i>Spirulina sp.</i>	670/–	CO ₂ megkötése háromlépcsős, ferde elrendezésű csöves PBR-ben	(de Morais és Costa 2007)
<i>Botryococcus braunii</i>	665/– 650/–	Állattartásból származó szennyvíz másodlagos hasznosítása mikroalga tenyésztésre	(An és mtsai. 2003)
<i>Chlorella sp.</i>	660/–	CO ₂ megkötése mikroalgával	(Sung és mtsai. 1999)
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Scenedesmus obliquus</i> <i>Anarystis nidulans</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Oscillatoria rubescens</i> , <i>Spirulina platensis</i>	440/–	A biomasszatermelés, a teljes fehérje, a klorofillek, lipid és zsírsav tartalmat vizsgálták, az édesvízi zöld és a kék-zöld algáknál nitrogénkoncentráció mellett	(Piorreck, Baasch, és Pohl 1984)

általam termesztett *Chlorella vulgaris* alga optikai vizsgálatokor a jellemző abszorbancia csücsait és völgyeit statisztikai módszerrel leválogattam és megállapítottam azok gyakoriságát (**38. ábra**).

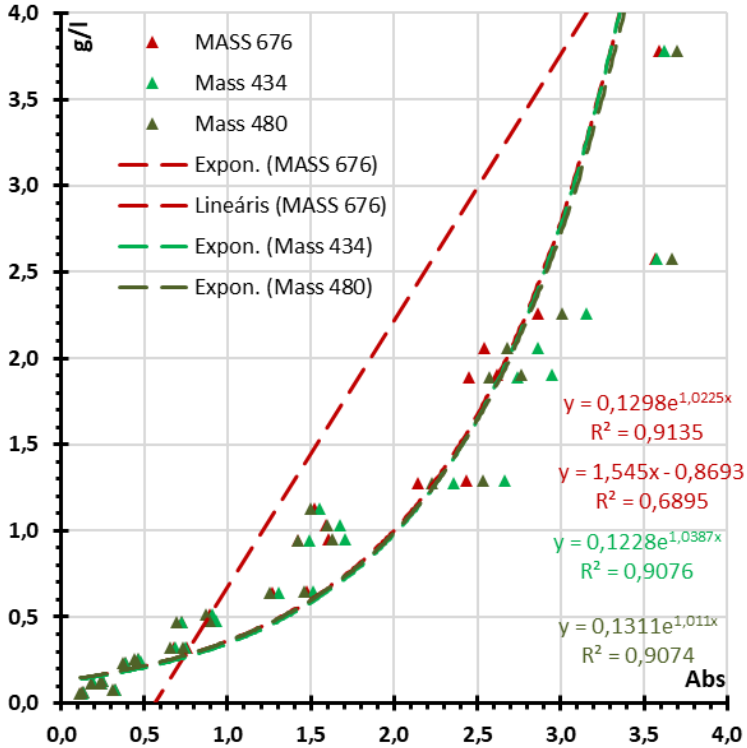


38. ábra A csúcsok (434, 480 és 676 nm környezetében) és völgyek (582 és 740 nm környezetében) gyakoriság diagrammjai

Forrás: saját

A kapott csúcs gyakoriságok nemcsak a kalibráció miatt, hanem a megvilágítás tervezése szempontjából is fontosak. A megvilágításhoz alkalmazott LED és fénycső sugárzási spektrumát mutatja az irodalmi összefoglalóban szemléltetett **17. ábra**. Méréseim alapján leggyakoribbnak talált csúcs-értékek közül a 434 nm hullámhosszt a LED, a 480 és 676 nm hullámhosszt a fénycső biztosítja. Mindezek igazolják, hogy algatenyésztéskor az általam használt kombinált megvilágítás a célravezető.

Összefüggések az algaszuszpenzió abszorbanciájának legnagyobb gyakorisággal előforduló csúcsai (434, 480 és 676 nm) és az algakoncentráció között (39. ábra).

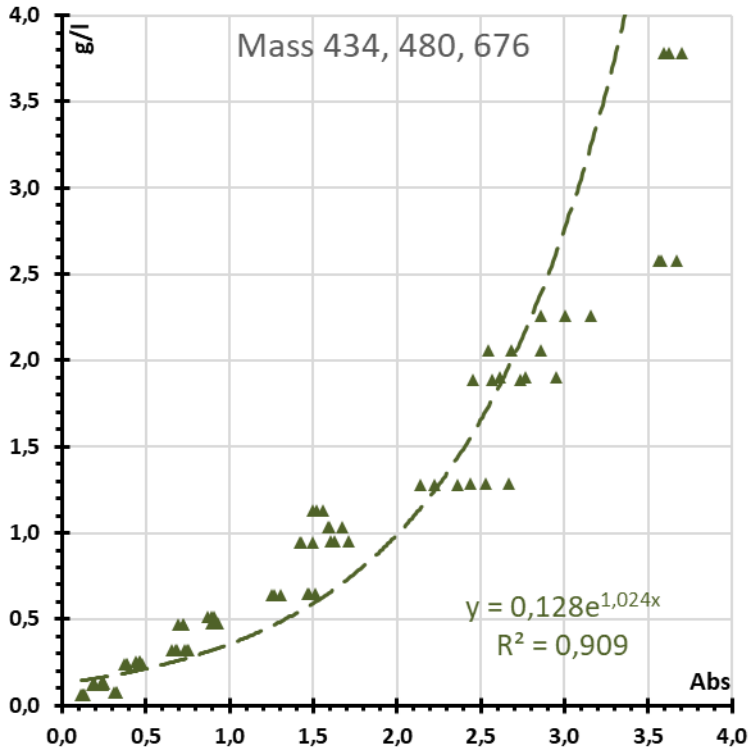


39. ábra Az abszorbancia csúcsok (434, 480 és 676 nm) és az algakoncentráció összefüggései.

Forrás: saját

676 nm-es hullámhosszon a lineáris közelítés közepesen szoros illeszkedést mutatott ($R^2 = 0,6895$). Az ábrán is látható, hogy a másik két hullámhosszon (434, 480 nm) is hasonló a tendencia, ezért az azokra illesztett lineáris trendvonal bemutatását szükségtelennek gondolom.

Mindhárom hullámhossz igen szoros exponenciális összefüggést mutat. Az összefüggéseket leíró egyenletek paraméterei is nagyon hasonlóak, így az ábrán gyakorlatilag egymáson futó görbéket láthatunk. A szoros összefüggés láttán, megvizsgáltam mi történik, ha a csúcsgyakorisági adatokat (434, 480, 676 nm) együtt, egy függvény paraméterezésével ábrázolom, ennek eredményét lásd a 40. ábrán.

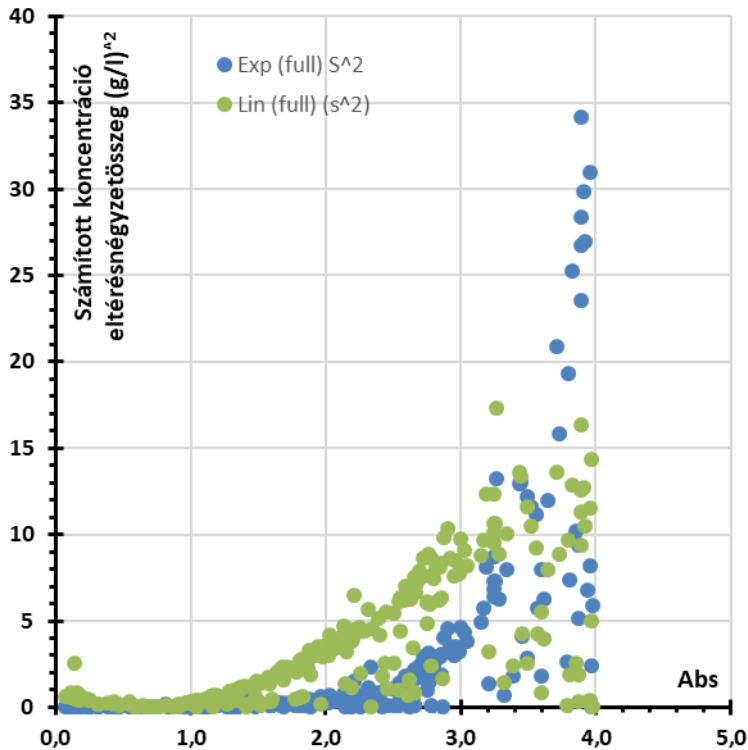


40. ábra A_{λ} abszorbanca csúcsok (434, 480 és 676 nm) és az algakonzentráció együttesen számolt összefüggése.

Forrás: saját

Megállapítható, hogy a vizsgált három hullámhosszhoz tartozó kalibrációs görbék azonos modellel is leírhatók ($y = 0,128 \cdot e^{1,024 \cdot x}$, $R^2 = 0,9093$).

A mérések pontosságának igazolására a leggyakoribb 676 nm-es abszorbanca csúcs eredményeit használtam összehasonlítási alapul. Meghatároztam a modell adatai és a mért adatok közti eltérésnégyzetösszegeket és ezeket ábrázoltam az abszorbanca függvényében. Az eredmény a korábbi levezetéshez hasonlóan a hármas értéket meg nem haladó abszorbanca értékekkel bizonyult megfelelőnek. Ezen belül is az exponenciális függvényvel való közelítés bizonyult pontosabbnak (41. ábra).

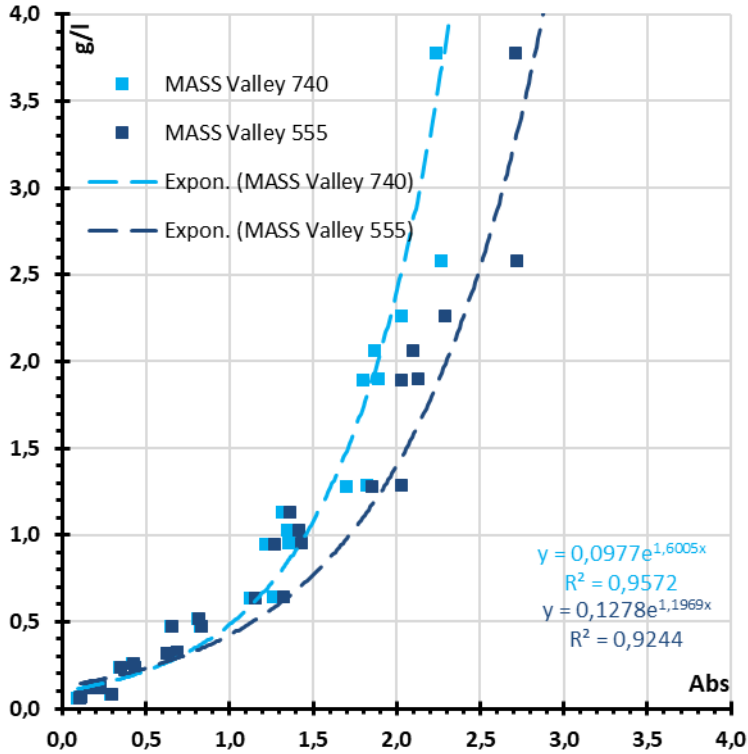


41. ábra 676 nm-en mért és számított adatokra az illeszkedés jóságát jellemző eltérésegyzet összegek az abszorbancia függvényében.

Forrás: saját

Fenti elemzéshez felhasználtam az összes (hígítás nélküli és kevésbé hígított) algaszuszpenzióra kapott értéket is. A kalibrációs görbék meghatározásánál, a megfelelő pontosság elérése érdekében 3 abszorbancia érték alatti minták (beleértve a hígított mintákat is) adatait használtam.

Összefüggések az algaszuszpenzió abszorbanciájának legnagyobb gyakorisággal előforduló völgyei (555 és 640 nm) és az algakoncentráció között (**42. ábra**)



42. ábra A_{λ} abszorbancia völgyek (740 és 555 nm) és az algakoncentráció összefüggései.

Forrás: saját

A völgyekre még a csúcsokra vonatkozó igen szoros összefüggéseknél is szorosabb összefüggést kaptam. Nem véletlen, hogy a szakirodalomban (Griffiths és mtsai. 2011, 2009; Hsieh és Wu 2009) előfordul a völgyek szerinti kalibrációs összefüggéssel való számolás.

A tapasztaltakat új tudományos eredményként fogalmazom meg:

*A_{λ} algakoncentráció optikai meghatározásához egyaránt használhatók a β -Carotene 434, 480 nm-es és a chlorophyll „a” 676 nm-es a csúcsai. Kalibrációs görbéik egy közös modellel is leírhatók ($y = 0,128 * e^{1,024 * x}$, $R^2 = 0,9093$).*

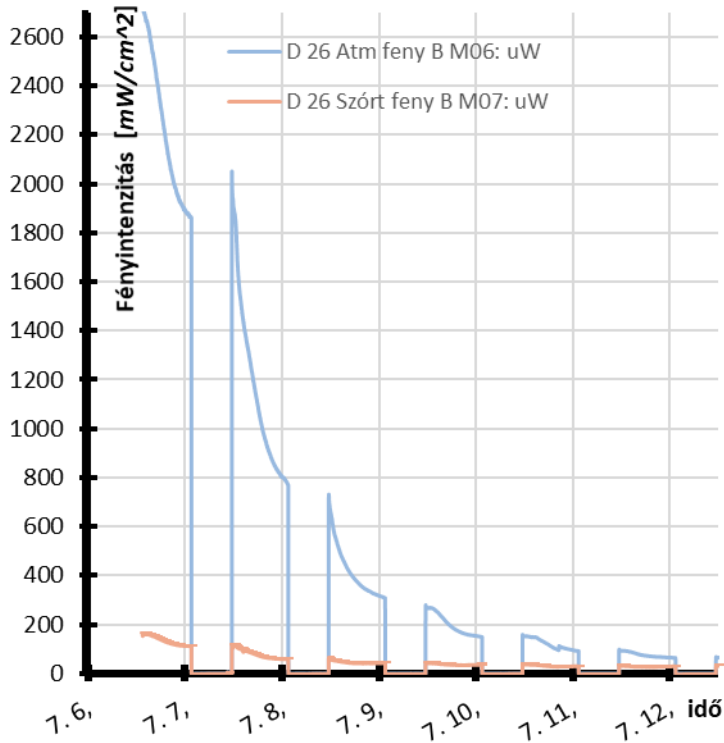
3. AZ ALGAMENNYISÉG FOLYAMATOS MEGHATÁROZÁSÁRA FÉNYÁRAM MÉRÉSEL

3.1. A HUOKREAKTOR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2017)

A 2016.04.12-2016.05.23. közötti időszakban végzett előkísérleteim tapasztalatai segítettek a 2017.07.05-2017.10.06. időszakban végzett kísérleteimet. Ebben a kísérleti időszakban az általam átalakított **PBR**-ben kívántam megvalósítani a folyamatos algatermesztést. Az algaprodukciót kétféle optikai módszerrel és a módszerhez illeszkedő mintavételi gyakorisággal vizsgáltam:

- *spektrofotométerrel*, a **PBR**-ből kivett minták abszorbanciáját vizsgáltam. és ezekből a vizsgálati eredményekből vontam le következtetéseket az algakoncentrációra vonatkozóan,
- *fényárammérővel* a fényforrásból érkező és a **PBR** keresztmetszetén átjutó direkt vagy szórt *fény intenzitásának* mérésével detektáltam az algakoncentráció folyamatos változásait.

Mindkét módszer esetében az időszakosan vett mintákból gravimetriás módszerrel meghatározott algakoncentrációval validáltam az eredményeket. Az online mérést biztosító fényárammérő eredményei jól mutatják, hogy az algák már 5 nap alatt jelentős mértékben elszaporodtak, amit az átbocsátott fény intenzitásának jelentős, mintegy harmincad részére való esése jelez (43. ábra).

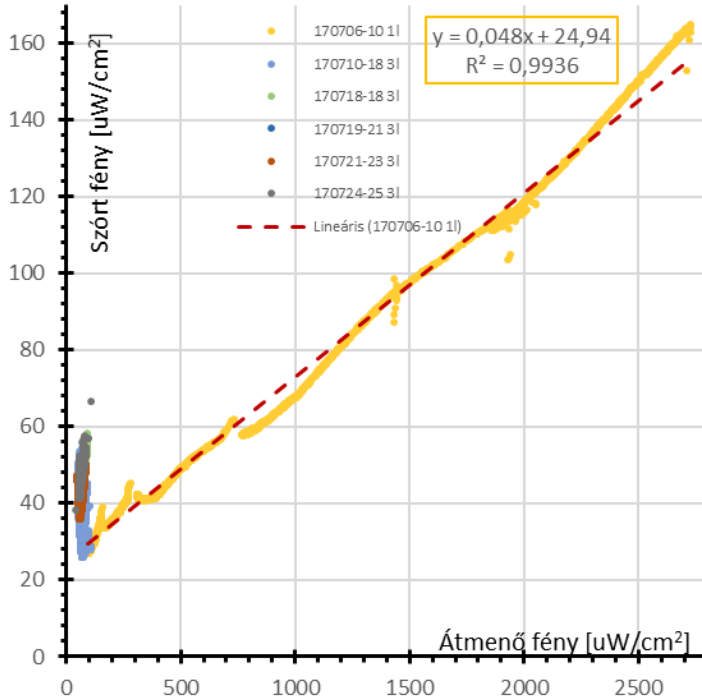


43. ábra Átmenő (kék) és visszavert (okker) fény intenzitás a PBR-ben a 2017.07.05.- indulást követő 07.06-07.12. időszakban

Forrás: saját

Az ábrán látható megszakítások a nappali, megvilágított és az éjszakai sötét (mérés nélküli) időszakokat mutatják. Az okker színnel jelölt szórt fény intenzitás is hasonló módon csökkent, csak a változás sokkal kisebb értékről indult, és kisebb meredekségű.

Összehasonlítva az átmenő, valamint a szórt fényt az algatermelés kezdeti szakaszában (2017.07.06-07.10) nagyon szoros összefüggést kaptam (44. ábra) amit a narancssárga közel egyenes széles sáv mutat.

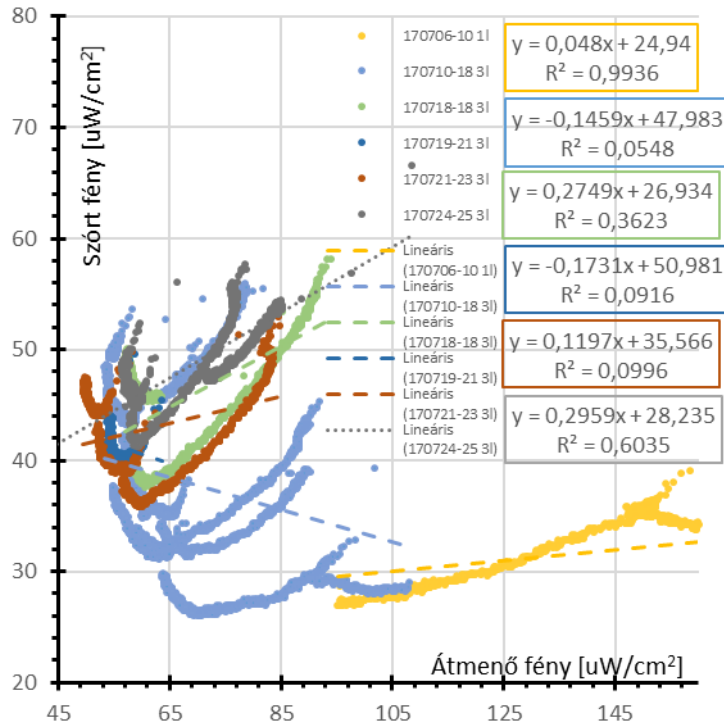


44. ábra Átmenő és szórt fény intenzitás összefüggése

Forrás: saját

A narancssárga sávon belül a mérési pontok, azok nagy sűrűsége miatt nem láthatók. Az illesztett egyenest piros szaggatott vonal mutatja, a determinációs együttható ($R^2 = 0,9936$) értéke igazolja az igen szoros illeszkedést. Az ábrán látható, hogy a naponta különböző színekkel jelölt néhány mintavételi ciklus és a hozzá tartozó minta mennyisége (2017.07.10-18. 3 l; 2017.07.18-18. 3 l; 2017.07.19-21. 3 l; 2017.07.21-23. 3 l; 2017.07.24-25. 3 l) adatait alacsony átmenő és tovább nem csökkenő szórt fény kapcsolatát mutató színes foltok jelölik.

A 44. ábra elejét felnagyítva látható (45. ábra), hogy az előbbi színes foltok - az adott időszakokhoz kapcsolódó - ciklikusan jelentkező, egymástól is eltérő parabola szerű görbék.

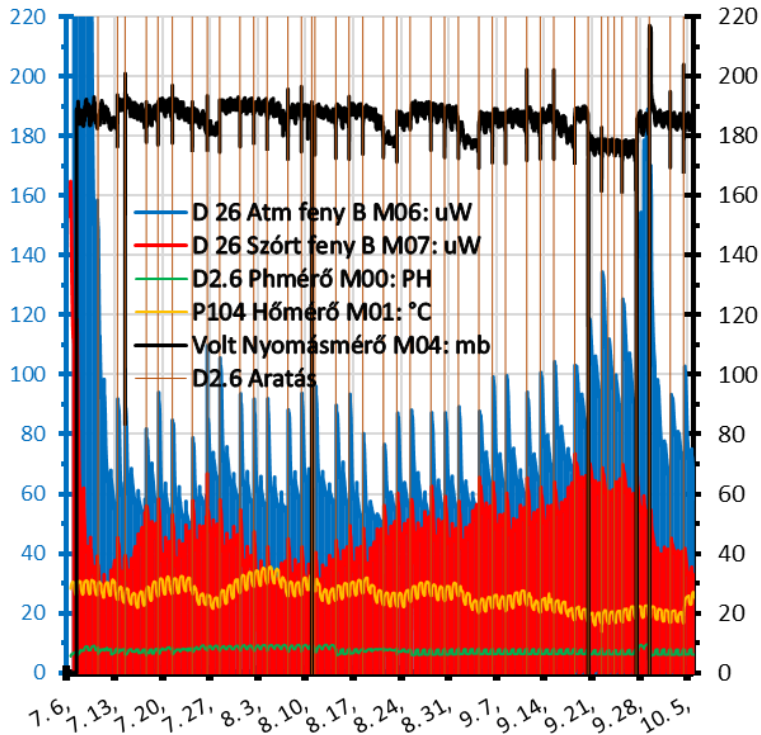


45. ábra Átmenő és szórt fény intenzitás összefüggése nagy algasűrűség esetén

Forrás: saját

A parabolászerű összefüggéseket és a rájuk nagyon lazán illeszkedő, nagyon eltérő lineáris összefüggéseket, nem tudtam értelmezni. Elfogadtam azt, hogy a 2017.07.10.-ét követően, már nem értékelhető az átmenő, valamint a szórt fény közötti összefüggés a nagy algasűrűség miatt. Ez már előre vetíti azt, hogy a későbbiekben részletezettek szerint a szórt fény intenzitásának változása alapján nem lehet becsülni az alga koncentrációt.

2017.07.19-2017.10.06. közötti időszakban sikerült elérnem fenttartható folyamatos algatermelést, heti 3 algaszürettel. Egy-egy szüret során 3 liter algaszuszpenziót eresztettem le, helyét 3 liter friss tápoldattal pótoltam. A 46. ábra. a 2017.07.06-08.25. mérési időszakra vonatkozó szenzoradatokat mutatja.



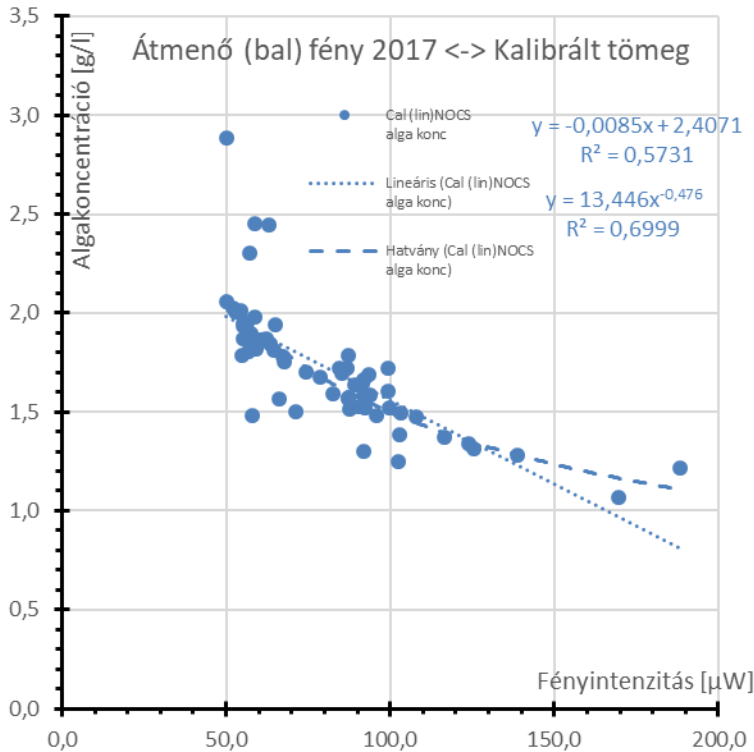
46. ábra 2017.07.06-10.06 mérési időszakra vonatkozó szenzoradatok (átmenő μW (kék) és szórt μW (piros) fényintenzitás, pH (zöld), hőmérséklet (okker), a gázbetáplálás nyomása mbar (fekete), mintavétel (barna függőleges vonal))

Forrás: saját

Az algaszüretelés időpontjait az ábrán barna függőleges vonalakkal jelöltem. Az ábrán jól láthatók a szüreteket követő hígulás miatti fényáteresztő képesség növekedések a kék (az éjszakai ciklusok miatt szakaszos) csúcsok lecsengésén. Az ezt követő időszak szenzoradatai is hasonló képet mutatnak a rendszeres szürettel fenntartott állandósult állapot miatt.

2017-ben mindkét detektor a baloldali ágban (a leszálló áramlási zónában) volt. Az egyik detektor az átmenő, a másik detektor a szórt fény intenzitását mérte.

Az átmenő fény („Átmenő (bal)”) jelű szenzor) és az algakoncentráció közti összefüggés laza lineáris ($R^2=0,5731$) és közepes hatvány ($R^2=0,6999$) összefüggést mutat (47. ábra).



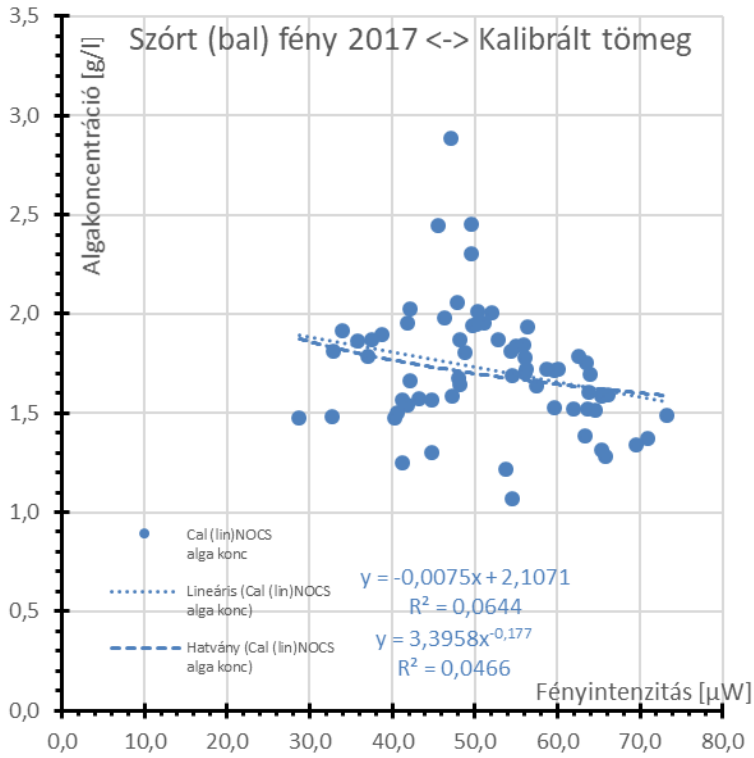
47. ábra Átmenő fényintenzitás és tömeg kapcsolata (bal oldali detektor) 2017 évben

Forrás: saját

A közepes hatvány összefüggés szerinti (szaggatott) görbétől is néhány pont feltűnően távol helyezkedik el. A hibát valószínűleg a bal ágban történő algakerakódások okozták, ugyanis ekkor még a gázbefúvás csak a jobb oldali ágban történt. A szórt fény („Szórt (bal)”) intenzitás és az algakonzentráció között nem találtam összefüggést ($R^2=0,0644$) (48. ábra).

A szórt fényrel történt mérések értékelhetetlensége miatt döntöttem úgy, hogy az átépített **PBR**-ben áthelyezem a detektort, és a továbbiakban az átmenő fény detektálására használom.

Mivel ez a detektor csak elhelyezésében különbözött az átmenő fényt mérőtől, ezért építhettem be a reaktor másik ágába.



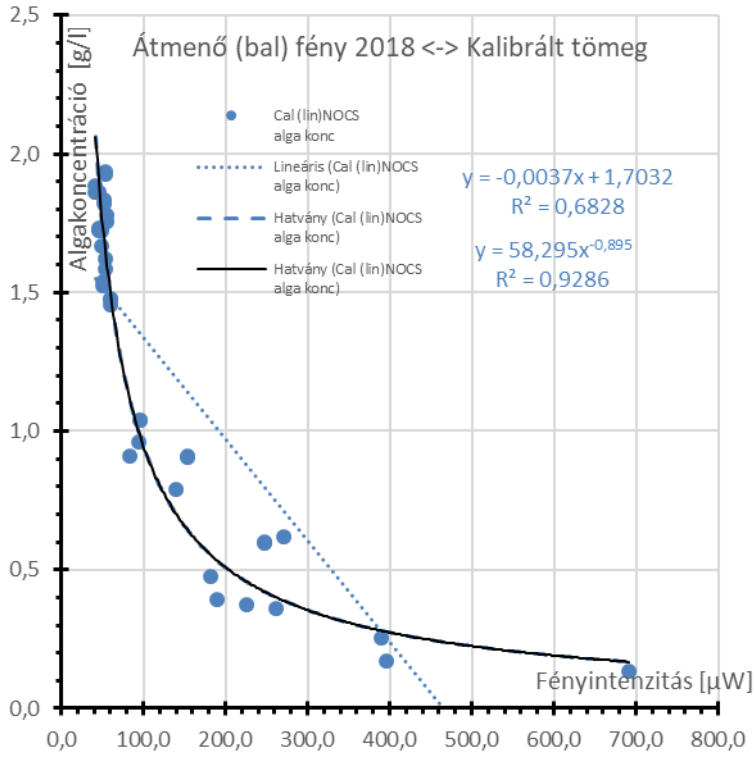
48. ábra A szórt fényintenzitás és tömeg kapcsolata (bal oldali detektor) 2017 évben

Forrás: saját

3.2. A HUOKREKTOR ÁTÉPÍTETT VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2018)

Az algabetapadás minimalizálása érdekében, a hurokreaktor mindkét szárába kiépítettem a gázbefúvás lehetőségét. Ezzel megvalósult a váltott irányú algaáramoltatás. Az algabetapadás minimalizálása a folyamatos fényárammérők működését is megbízhatóbbá tette. A módosított változattal 2018.01.16-2018.02.23. időszakban végeztem az algatermelést. Megvizsgáltam a detektorok által mintavételek időpontjaiban mért fényintenzitások és a mintákban meghatározott algakoncentrációk összefüggését.

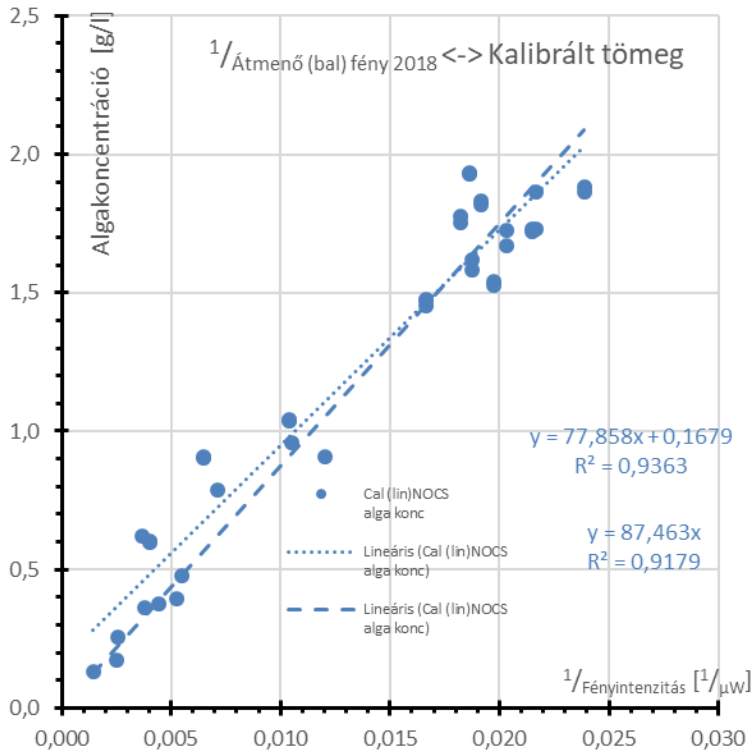
A baloldali ágban levő átmenő fény („Átmenő (bal)”) detektor és az algakoncentráció közti összefüggés közepes lineáris ($R^2=0,6828$) és igen szoros hatvány ($R^2=0,9286$) összefüggést mutat (49. ábra).



49. ábra Átmenő fényintenzitás és az algakoncentráció kapcsolata (bal oldali detektor) 2018 évben

Forrás: saját

A hatvány összefüggés nemcsak szoros, hanem a kitevő értéke is -1-hez közeli (-0,895). A -1-es kitevő reciprok összefüggést jelent, ezért megvizsgáltam a fényintenzitás reciprokának és az algakoncentrációnak az összefüggését is (50. ábra).

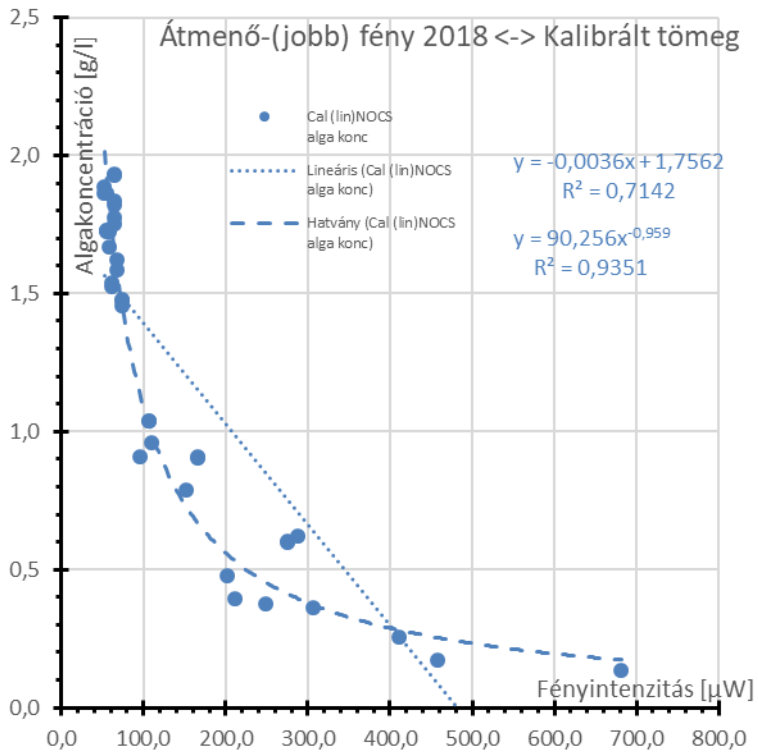


50. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (bal oldali detektor) 2018 évben

Forrás: saját

A fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció között lineáris az összefüggés ($R^2=0,9363$). Ha a tengelymetszetet 0-nak választjuk, akkor az összefüggés egyszerű arányossággá változik ($y=87,463*x$) az igen szoros összefüggést jelző R^2 -el (0,9179).

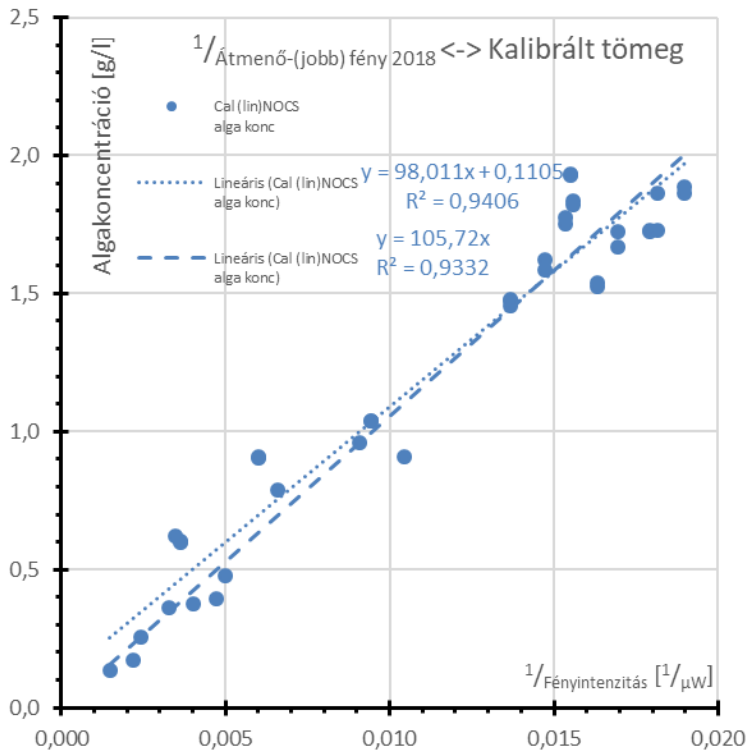
Az átépítést követően a jobboldali ágban levő detektorral („Átmenő (jobb)”) mért átmenő fény és az algakoncentráció közti összefüggés közepesen lineáris ($R^2=0,7142$) és igen szoros hatvány ($R^2=0,9351$) összefüggést mutatott (51. ábra).



51. ábra Átmenő fényintenzitás és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2018 évben

Forrás: saját

Ebben az esetben is a hatvány összefüggés nemcsak szoros, hanem a kitevő értéke is a -1-hez közeli (-0,959). Mivel a -1-es kitevő reciprok összefüggést is jelent, ezért itt is megvizsgáltam a fényintenzitás reciprokának és az algakoncentrációnak az összefüggését (52. ábra).



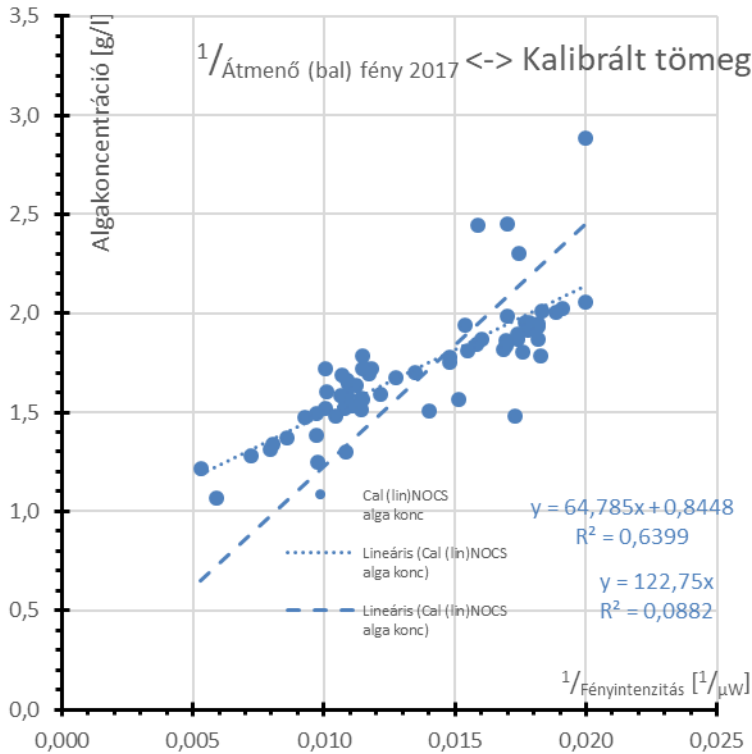
52. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2018 évben

Forrás: saját

Ebben az esetben is megállapítható, hogy a fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció között lineáris az összefüggés ($R^2=0,9406$). Amennyiben a tengelymetszetet 0-nak választjuk, akkor az összefüggés egyszerű arányossággá változik ($y=105,72 \cdot x$) igen szoros összefüggést jelző R^2 -el (0,9332).

3.3. A HUOKREAKTOR MINDKÉT VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÖSSZEHAONLÍTÓ ÉRTÉKELÉSE (2017-2018)

A bal oldali detektort, mindkét változatban az átmenő fény mérésére használtam, ezért meg tudtam vizsgálni, hogy a 2018-as év adatai által felfedezett reciprok összefüggés érvényes-e a 2017-ben mért adatokra vonatkozóan is. Az átmenő fény („Átmenő (bal)”) és az algakoncentráció közti összefüggés laza lineáris ($R^2=0,5731$) és közepes hatvány ($R^2=0,6999$) összefüggést mutat (47. ábra). A hatványfüggvény illesztéssel meghatározott kitevő -0,476 volt. ennek ellenére megvizsgáltam a -1-es kitevőnek megfelelő reciprok összefüggést is (53. ábra)



53. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2017 évben

Forrás: saját

A reciprok összefüggés ebben az esetben csak közepesen szorosnak bizonyult ($R^2=0,6399$). Amennyiben a tengelymetszetet 0-nak választjuk, akkor az egyszerű arányosságnak megfelelő összefüggés értékelhetetlen ($R^2=0,0882$).

A tapasztaltakat új tudományos eredményként fogalmazom meg:

Az algakoncentráció folyamatosan regisztrálható a fényforrásból érkező algaáramon átmenő fény intenzitásának mérésével. A nagy megbízhatósággal meghatározott, összefüggés szerint az algakoncentráció arányos az átjutó fény intenzitásának reciprokával. Az algatermeléshez szükséges koncentráció tartományban a szórt fény intenzitása és az algakoncentráció között nincs értékelhető kapcsolat.

4. ÁRAMLÁSI SEBESSÉG ÉS AZ ALGA LETAPADÁS KAPCSOLATA

A rendelkezésre álló membrános légkompresszor a 15 liter szuszpenzióval feltöltött **PBR**-ben megfelelő átlevegőztetés mellett 215 mbar nyomást képes biztosítani (ami 2,15 m vízoszlopnak felel meg). A normál működés során azonban a literes tágulási tartály üres volt, minek következtében a 1,65 m magas vízoszlop átfuvasánál az üzemi nyomás csak 165-180 mbar között mozgott. A rendszer normál üzemeltetéséhez legalább 14 liter szuszpenzió feltöltésére volt szükséges. Az alga letapadásának elkerülése az áramoltatáshoz szükséges minimális túlnyomással csak a gázbefúvás oldalán oldható meg.

A **PBR** 2018. évi átépítése során az áramlási sebesség megfelelő beállításával és váltakozó oldali gázbefúvatással elértem, hogy a fel és leszálló ágak falain nem keletkezett algakerakódás. A berendezés alján elhelyezett algacsapda segítségével, az ott besűrűsödő alagaszuszpenzió, rendszeresen eltávolítható volt. Ezzel lehetővé vált, hogy a kevésbé életerős algák kikerüljenek a rendszerből. További vizsgálatlaldalant eldöndtendő, hogy ez milyen mértékű szelekciót jelent.

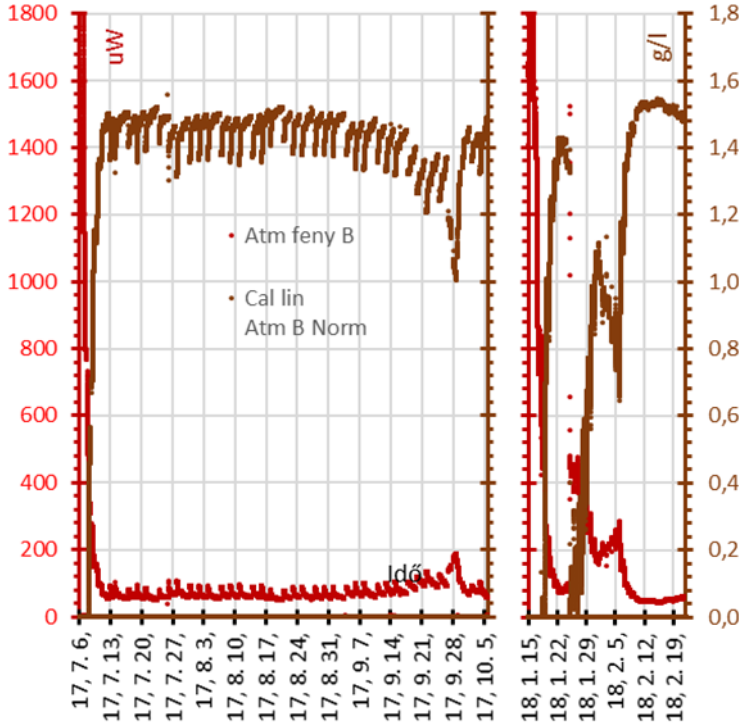
Az algakerakódás – a fényárammérő szenzor előtti falra – jelentős mértékben befolyásolja a fény intenzitását is. Ebből következően az is megállapítható, hogy a korábban már kimutatott 2017. és 2018-as év átmenő fényre vonatkozó adatai közül a 2017. évi adatokat jelentősen torzította a mérés ágában, az eltelt idő függvényében kialakult algabetapadás. Az átépített 2018. évi berendezésben, ahol mindkét oldalon már biztosítva volt a gázbefúvás, és lehetővé vált a fúvókák váltott üzemi használata, nagymértékben csökkent az algabetapadás. Ezek az eredmények támasszák alá a berendezés átépítésének helyességét.

A tapasztaltakat új tudományos eredményként fogalmazom meg:

*A **PBR** átalakításával mindkét függőleges ághban megoldódott a gázáram bejuttatása. Ezzel és a megfelelő áramlási sebesség beállításával elérhetővé vált, hogy ne keletkezzen a **PBR** falán algakerakódás.*

5. AZ ALGA PRODUKCIÓ IDŐBELI VÁLTOZÁSA

A fényintenzitási adatokból meghatároztam mindkét időszak algakonzentrációinak időbeni változását a kalibrációs összefüggések felhasználásával (54. ábra).



54. ábra Átmenő fény intenzitás és számított algakonzentráció az idő függvényében

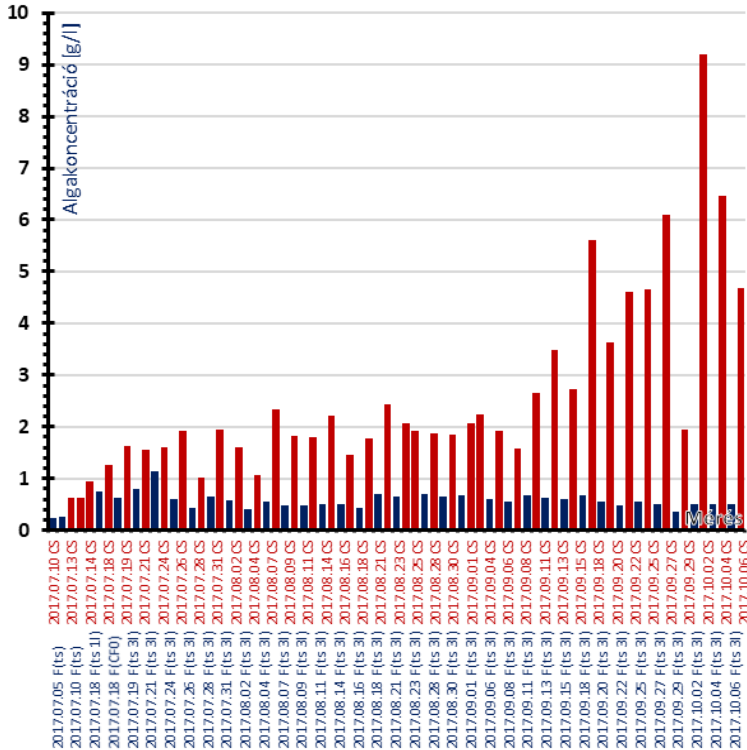
Forrás: saját

A kezdeti időszakban (2017) jól látható, hogy a rövid felfutást követő egyenletes mintavételezéssel sikerült az algatermelést állandósítani, eltekintve a 2017.09.28-i algaelhalástól (a folyamat megszakítását a levegőellátás rendszerében bekövetkezett meghibásodás okozta, aminek következménye lett a pH érték 46. ábrán is látható eltolódása miatti algaelhalás). A második időszakban (2018) az algatermelés növelése volt a célom. Az újonnan beépített leeresztő csók segítségével az algaeltávolítás intenzívebb és folyamatosabb lett. Az ezáltal a főáramban alacsonyabban tartott koncentráció (54. ábra jobb oldali részára) biztosította a fény

jobb hasznosítását. Jelentős mennyiségi ugrás (10 liter), a 10. napon (2018.01.26) látható, ami a főárambeli mennyiség 2/3 át meghaladó szüretelést jelentett.

5.1. A PBR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2017)

A **PBR** első változatában is volt egy kisebb mintavevő csonk, amely alkalmas volt az alga gyűjtésére. A mintavétel során a mintavételi csonkban az algakonzentrációt is meghatároztam. A mintavételek során, az első hét után, a csonkmintán kívül még 3 liter mintát is leszűreteltem. Az **55. ábra** az algakonzentrációkat a mintavételek időpontjaiban mutatja.

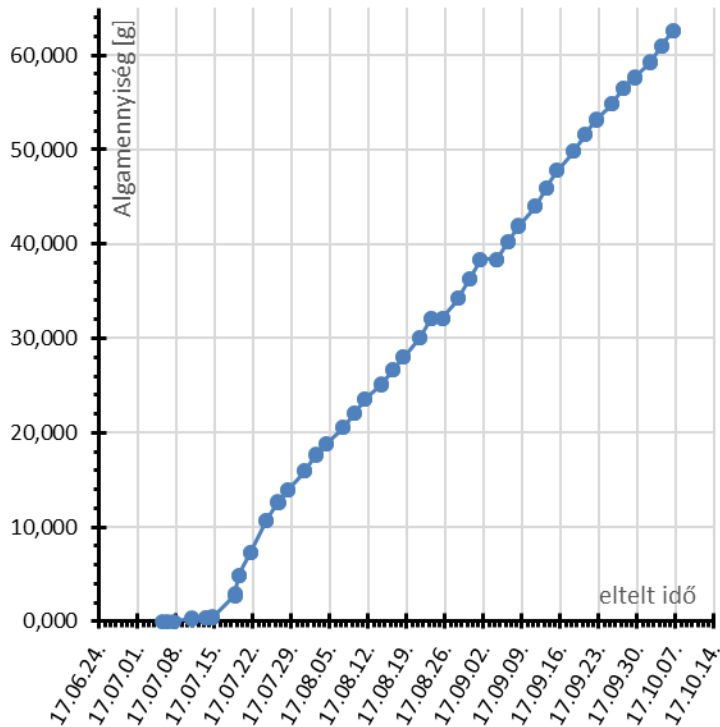


55. ábra A főáramból (kék) és a mintavevő leeresztő csonkból (piros) vett algakonzentrációk (2017)

Forrás: saját

A főáram koncentrációi, melyek az ábrából is leolvashatók 0,5 g/l körül ingadoznak, ez megegyezik a szakirodalmakban is többször említett szokásos koncentrációkkal. A mintavételi csonkban összegyűlt alga koncentrációk 2-8 g/l körül ingadoznak, elsősorban attól függően, hogy az előző mintavétel óta mennyi idő telt el.

Az **56. ábra** a működés három és fél hónapja alatt eltávolított kumulált alga mennyiségét mutatja.



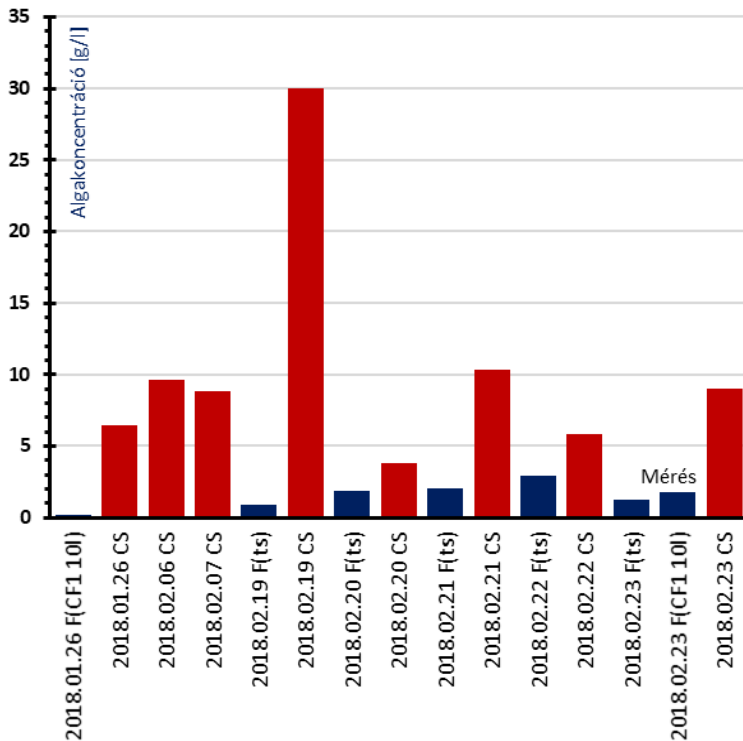
56. ábra A_{Σ} eredeti bioreaktorban (2017) az adott napig eltávolított algamennyiség (g).

Forrás: saját

A kimutatott alga szárazanyag mennyiségét a kísérlet során kvázi azonos mennyiségű algaszuszpenzió mintavételezéseivel nyertem. Az egész időszak alatt elért teljes algatermés 64 g volt.

5.2. A MÓDOSÍTOTT PBR-BEN MÉRT ADATOK ÉRTÉKELÉSE (2018)

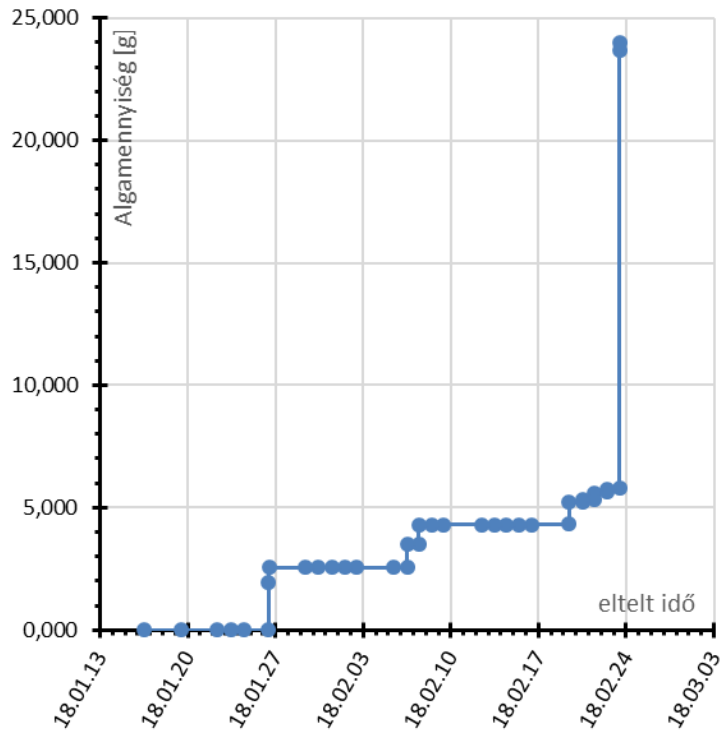
Az átépített **PBR**-be előző változatnál hatékonyabb, ülepítésre is alkalmas leeresztő csonkot építettem be. Az ötletet a korábbi leeresztő csonkban megfigyelt alga ülepedés adta. Az újonnan beépített csonk és a vele párhuzamosan kialakított új eljárás (főárami mintákat a felső mintavételi ponton keresztül vettem) lehetővé tette a mindenkor ülepített alga mintavételét, kivéve a 13. (2018.01.26) és a 41. (2018.02.23.) napi algaszüretelést (**57. ábra**).



57. ábra A főárámból (kék) és a továbbfejlesztett leeresztő csonkból (piros) vett algakoncentrációk (2018)

Forrás: saját

A leeresztő csonkban ülepedett minták koncentrációi 5-10 g/l tartományban ingadoztak (piros színnel jelölve). A főárámból időközönként vett 10 ml-es minták (kék színnel jelölve) elhanyagolható mértékben változtatták meg a 14 liter űrtartalmú berendezésben maradt algakoncentrációt. Az **58. ábra** a működés 41 napja alatt eltávolított kumulált alga mennyiségét mutatja.



58. ábra A módosított hurokreaktorban az adott napig eltávolított algamennyiség (g).

Forrás: saját

Jelentős mennyiségi ugrás (10 liter), a 13. napon (2018.01.26) látható, ami a főárambeli mennyiség 2/3 át meghaladó szüretelést mutat. A rendszer leállítása és kiürítése 41. napon (2018.02.23.) történt. A kísérleti időszak alatt elért teljes algatermés 24 g volt.

A tapasztaltakat új tudományos eredményként fogalmazom meg:

A PBR-be újonnan beépített algacsapdával ellátott leeresztő csonk egyszerű gravitációs módon is megoldhatja az alga kinyerését a szuszpenzióból. A berendezés alján létesített algacsapda, a főáramhoz képest mintegy 10-szeres (5-10 g/dm³) koncentrációjú algaszuszpenziót eredményez.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A 2018-as átépítés során az áramlási sebesség megfelelő beállításával és váltakozó oldali gázbefúvatással elértem, hogy nem keletkezett a **PBR** falán alga lerakódás. A berendezés alján elhelyezett algacsapda segítségével, az ott besűrűsödő algaszuszpenzió, rendszeresen eltávolíthatóvá vált, lehetőség adódik nagyobb koncentrációjú algaszuszpenzió kinyerése is. Ennek ismeretében megvizsgálandó, hogy ez a magas koncentrációjú algaszuszpenzió közvetlenül alkalmas-e olajkinyerésre.

A kísérleti munka folyamán további vizsgálattal eldönthető, hogy milyen mértékű az algák minőségi szelekciója. Ezzel módszerrel lehetőség nyílik a kevésbé életerős algák nagyobb arányú eltávolítására az algacsapdán keresztül.

További fejlesztési lehetőség még a levegő bejuttatás mikro-buborék formájában, amelyet előzetes szimulációval optimalizálni lehet.

Ígéretes az alga koncentráció folyamatos mérésére kidolgozott optikai módszer is, amelynek alkalmazásával kifejleszhető a **PBR** vezérlésének automatizálása.

ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK)

1. Algatermesztésre alkalmazott **PBR**-ben vizsgáltam a bejuttatott gázáram által előidézett áramlást. Az áramlást **Mixture** és **VOF** modellekben készített modellekkel szimuláltam. A **VOF** modell segítségével végzett számítások megegyeztek a mérési eredményekkel. A **Mixture** modellel készített számításokban az áramlási formák nem voltak elkülöníthetők, de a turbulencia pontok jól megközelíthetők voltak.
2. Az algakoncentráció optikai meghatározásához egyaránt használhatók a β -Carotene 434, 480 nm-es és a chlorophyll „a” 676 nm-es a csúcsai. Kalibrációs görbéik egy közös modellel is leírhatók ($y = 0,128 * e^{1,024 * x}$, $R^2 = 0,9093$).
3. Az algakoncentráció folyamatosan regisztrálható a fényforrásból érkező algaáramon átmenő fény intenzitásának mérésével. A nagy megbízhatósággal meghatározott, összefüggés szerint az algakoncentráció arányos az átjutó fény intenzitásának reciprokával. Az algatermeléshez szükséges koncentráció tartományban a szórt fény intenzitása és az algakoncentráció között nincs értékelhető kapcsolat.
4. A **PBR** átalakításával mindkét függőleges ágban megoldódott a gázáram bejuttatása. Ezzel és a megfelelő áramlási sebesség beállításával elérhetővé vált, hogy ne keletkezzen a **PBR** falán algalerakódás.
5. A **PBR**-be újonnan beépített algacsapdával ellátott leeresztő csonk egyszerű gravitációs módon is megoldhatja az alga kinyerését a szuszpenzióból. A berendezés alján létesített algacsapda, a főáramhoz képest mintegy 10-szeres (5-10 g/dm³) koncentrációjú algaszuszpenziót eredményez

ÖSSZEFOGLALÁS

Az egyes algafajták erős virulenciája ellenére nagyon nehéz jó termelő berendezést megvalósítani. A folyamat ugyanis önmagát gátló jellegű: a szaporodással csökken a fejlődési intenzitás. Ez minden zárt terű organizmus-fejlődés esetén így van, csak az algánál nem elegendő a tápláló anyag folyamatos növelése, a körülmények biztosítása. A meghatározó fotó-aktivitás is szükséges, amely a reaktortérben megvalósuló fényeloszlás növelésével lehetséges. Ez a problémakör jelölte ki a célkitűzéseimet, az eddigi irodalmi eredmények figyelembevételével. A gyakorlat számára használható keverési, felületi tisztítási megoldások, a termelés optimalizálása érdekében fogalmaztam meg a kutatási hipotéziseimet. A folyamatos üzemelés kialakításához ismernünk kell, hogy a reaktorban lévő keverék milyen mennyiségű algatestet tartalmaz, milyen mértékben szükséges a folyamatos betakarítást végezni.

Munkám során a rendelkezésemre álló algatermesztő **PBR**-ben, majd az általam átépített változatában hatékony algatermesztést valósítottam meg. A berendezést a működő **PBR** jellemzőinek vizsgálatából és értékeléséből szerzett tapasztalatok és szimulációs modell számítások segítségével korszerűsítettem. A berendezésben a buborékoszlop által keltett hidrodinamikai áramlások jellemzőit ANSYS FLUENT szoftver környezetben **Mixture** és **VOF** szimulációs modellszámításokkal határoztam meg.

Az átépített berendezésben a megfelelő áramlási viszonyok kialakításával (gázbeporlasztás módosítása, váltott irányú áramoltatás) minimalizáltam a berendezés falán kialakuló algaletapadást.

A berendezés aljára újonnan beépített algacsapda segítségével, sikerült jelentősen növelnem a szüretelt algaszuszpenzió algakoncentrációját.

Olyan optikai mérési módszert dolgoztam ki melynek későbbi fejlesztésével lehetőség nyílik az alga koncentráció folyamatos ellenőrzésére és ennek folyamányaként a **PBR** működésének automatizálására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt köszönetem fejezem ki témavezetőimnek, **Prof. Dr. Neményi Miklós** akadémikus Úrnak és **Prof. Dr. Fenyvesi László** tanszékvezető Úrnak, akik szakmai tanácsaikkal és iránymutatásaikkal segítették a disszertáció elkészítését, valamint doktori tanulmányaim során biztosította számomra a kutatási feltételeket.

Köszönettel tartozom a Biológiai Rendszerek Műszaki és **Élelmiszeripari** Tanszék valamennyi munkatársának. Kiemelt köszönettel tartozom **Dr. Kovács Attila József** tanszékvezető Úrnak munkám támogatásáért és a Magas lipidtartalmú szuszpenziókból szerves anyag kinyerése és iparszerű hasznosítása GOP-1.1.1-11-2012-0157, pályázat anyagainak rendelkezésemre bocsátásáért és **Ambrus Bálint**, **Kovács István** tanszéki mérnökök szakmai segítségnyújtásáért.

Köszönettel tartozom munkám támogatásáért Széchenyi István Egyetem Növénytudományi Tanszékét **korábban** vezető **Prof. Dr. Ördög Vince** Úrnak szakmai segítségnyújtásáért és **Bálint Péter**, tanszéki mérnöknek a kiegészítő mérések elvégzéséért

Köszönettel tartozom **Dr. Gulyás Zoltán** Úrnak, a Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ Mezőgazdasági és Gépesítési Intézet vezetőjének, és az ott dolgozó **Deákvári József**, **Dr. Szalay Kornél** korábbi kollegáimnak, hogy biztosítottak a mérőeszközöket a vizsgálataimhoz.

Köszönettel tartozom, **Dr. Kardeván Péter**, **Dr. Csorba Ádám** Uraknak a spektrometriai ismeretem bővítésében nyújtott szerepükért.

Végül, de nem utolsósorban, hálával tartozom **családomnak** önzetlen támogatásukért, akik bíztattak és építő kritikával láttak el munkám során.

IRODALOMJEGYZÉK

- Ai, W., S. Guo, L. Qin, és Y. Tang. 2008. „Development of a Ground-Based Space Micro-Algae Photo-Bioreactor”. *Advances in Space Research* 41 (5): 742–47. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.060>.
- Akhtar, Abid, Vishnu Pareek, és Moses Tadé. 2007. „CFD Simulations for Continuous Flow of Bubbles through Gas-Liquid Columns: Application of VOF Method”. *Chemical Product and Process Modeling* 2 (1): 1–19. <https://doi.org/10.2202/1934-2659.1011>.
- An, Jin-Young, Sang-Jun Sim, Jin Suk Lee, és Byung Woo Kim. 2003. „Hydrocarbon Production from Secondarily Treated Piggery Wastewater by the Green Alga *Botryococcus Braunii*”. *Journal of Applied Phycology* 15 (2/3): 185–91. <https://doi.org/10.1023/A:1023855710410>.
- „ANSYS Fluent 15 UDF Manual”. 2013. In , Release 15:1–564. ANSYS Inc. <http://www.ansys.com>.
- „ANSYS Fluent 15 Users Guide”. 2013. In , Release 15:1–2620. ANSYS Inc. <http://www.ansys.com>.
- Ayed, H., J. Chahed, és V. Roig. 2007. „Hydrodynamics and Mass Transfer in a Turbulent Buoyant Bubbly Shear Layer”. *AIChE Journal* 53 (11): 2742–53. <https://doi.org/10.1002/aic.11290>.
- Barclay, W., C. Wyman, R. A. Levin, és L. Cheng. 1988. „Development of microalgal systems for the production of liquid fuels. (Société pour l’algologie appliquée. International Meeting (4th: 1987: Villeneuve-d’Ascq France)”. In *Algal Biotechnology*, by T. Sadler, 55–64. London; New York, USA, Eisevier Applied Science.
- Baten, J.M. van, J. Ellenberger, és R. Krishna. 2003. „Hydrodynamics of Internal Air-Lift Reactors: Experiments versus CFD Simulations”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 42 (10): 733–42. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(02\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00076-4).
- Becker, S., A. Sokolichin, és G. Eigenberger. 1994. „Gas-Liquid Flow in Bubble Columns and Loop Reactors: Part II. Comparison of Detailed Experiments and Flow Simulations”. *Chemical Engineering Science* 49 (24): 5747–62. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(94\)00290-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(94)00290-8).

- Bertola, Francesco, Marco Vanni, és Giancarlo Baldi. 2002. „Application of Computational Fluid Dynamics to Multiphase Flow in Bubble Columns”. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 1 (1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1002>.
- Bitog, J.P., I.-B. Lee, C.-G. Lee, K.-S. Kim, H.-S. Hwang, S.-W. Hong, I.-H. Seo, K.-S. Kwon, és E. Mostafa. 2011. „Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review”. *Computers and Electronics in Agriculture* 76 (2): 131–47. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>.
- Blažej, M., G.M. Cartland Glover, S.C. Generalis, és J. Markoš. 2004. „Gas–Liquid Simulation of an Airlift Bubble Column Reactor”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 43 (2): 137–44. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00010-2).
- Bold, Harold C. 1949. „The Morphology of *Chlamydomonas chlamydogama*, Sp. Nov.”. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 76 (2): 101–8. <https://doi.org/10.2307/2482218>.
- Bopp, Stephanie K., és Teresa Lettieri. 2007. „Gene Regulation in the Marine Diatom *Thalassiosira Pseudonana* upon Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)”. *Gene* 396 (2): 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2007.03.013>.
- Borowitzka, Michael A. 1999. „Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters”. *Journal of Biotechnology* 70 (1–3): 313–21. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8).
- Boston, H. L., és W. R. Hill. 1991. „Photosynthesis-Light Relations of Stream Periphyton Communities”. *Limnology and Oceanography* 36 (4): 644–56. <https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.4.0644>.
- Brownbridge, George, Pooya Azadi, Andrew Smallbone, Amit Bhawe, Benjamin Taylor, és Markus Kraft. 2014. „The Future Viability of Algae-Derived Biodiesel under Economic and Technical Uncertainties”. *Bioresour. Technol.* 151: 166–73. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.062>.
- Cardozo, Karina H.M., Thais Guaratini, Marcelo P. Barros, Vanessa R. Falcão, Angela P. Tonon, Norberto P. Lopes, Sara Campos, és mtsai. 2007. „Metabolites from Algae with Economical Impact”. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology* 146 (1–2): 60–78. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2006.05.007>.

- Carlsson, Anders S, Jan B van Beilen, Ralf Möller, és David Clayton. 2007. *Micro- and Macro-Algae: Utility for Industrial Applications: In: Bowles, D. (Ed.) Outputs from the EPOBIO: Realising the Economic Potential of Sustainable Resources Bioproducts from Non-Food Corps Project*. CNAP, University of York, UK. CPL Press.
- Cartland-Glover, G.M, és S.C Generalis. 2004. „Gas-Liquid-Solid Flow Modelling in a Bubble Column”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 43 (2): 117–26. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00009-6).
- Castrillo, M., L.M. Lucas-Salas, C. Rodríguez-Gil, és D. Martínez. 2013. „High PH-Induced Flocculation–Sedimentation and Effect of Supernatant Reuse on Growth Rate and Lipid Productivity of *Scenedesmus Obliquus* and *Chlorella Vulgaris*”. *Bioresource Technology* 128: 324–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.114>.
- Chaumont, Daniel. 1993. „Biotechnology of Algal Biomass Production: A Review of Systems for Outdoor Mass Culture”. *Journal of Applied Phycology* 5 (6): 593–604. <https://doi.org/10.1007/BF02184638>.
- Chen, C. Y., és E. G. Durbin. 1994. „Effects of PH on the Growth and Carbon Uptake of Marine Phytoplankton”. *Marine Ecology Progress Series* 109: 83–94. <https://doi.org/10.3354/meps109083>.
- Chisti, Yusuf. 2007. „Biodiesel from Microalgae”. *Biotechnology Advances* 25 (3): 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>.
- Chiu, Sheng-Yi, Ming-Ta Tsai, Chien-Ya Kao, Seow-Chin Ong, és Chih-Sheng Lin. 2009. „The Air-Lift Photobioreactors with Flow Patterning for High-Density Cultures of Microalgae and Carbon Dioxide Removal”. *Engineering in Life Sciences* 9 (3): 254–60. <https://doi.org/10.1002/elsc.200800113>.
- Contreras, A., F. García, E. Molina, és J. C. Merchuk. 1998. „Interaction between CO₂-Mass Transfer, Light Availability, and Hydrodynamic Stress in the Growth of *Phaeodactylum Tricornutum* in a Concentric Tube Airlift Photobioreactor”. *Biotechnology and Bioengineering* 60 (3): 317–25. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19981105\)60:3<317:AID-BIT7>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19981105)60:3<317:AID-BIT7>3.0.CO;2-K).
- Corneliussen, Sidsel, Jean-Paul Couput, Eivind Dahl, Eivind Dykesteen, Kjell-Eivind Frøysa, Erik Malde, Håkon Moestue, Paul Ove Moksnes, Lex Scheers, és Hallvard Tunheim. 2005.

- Handbook of Multiphase Flow Metering*. Revision 2. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM), The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals (Tekna). http://nfogm.no/wp-content/uploads/2014/02/MPFM_Handbook_Revision2_2005_ISBN-82-91341-89-3.pdf.
- Cornet, J.-F., C.G. Dussap, J.-B. Gros, C. Binois, és C. Lasseur. 1995. „A Simplified Monodimensional Approach for Modeling Coupling between Radiant Light Transfer and Growth Kinetics in Photobioreactors”. *Chemical Engineering Science* 50 (9): 1489–1500. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00022-W](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00022-W).
- Danila, Elena, és Dorin Dumitru Lucache. 2016. „Efficient lighting system for greenhouses”. In *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 439–44. Iasi, Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781379>.
- Dassey, Adam J., és Chandra S. Theegala. 2013. „Harvesting Economics and Strategies Using Centrifugation for Cost Effective Separation of Microalgae Cells for Biodiesel Applications”. *Bioresource Technology* 128: 241–45. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.061>.
- Degen, Jörg, Andrea Uebele, Axel Retze, Ulrike Schmid-Staiger, és Walter Trösch. 2001. „A Novel Airlift Photobioreactor with Baffles for Improved Light Utilization through the Flashing Light Effect”. *Journal of Biotechnology* 92 (2): 89–94. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00350-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00350-9).
- Delnoij, E., J.A.M. Kuipers, és W.P.M. van Swaaij. 1997. „Computational Fluid Dynamics Applied to Gas-Liquid Contactors”. *Chemical Engineering Science* 52 (21–22): 3623–38. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00268-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00268-6).
- Delnoij E., J.A.M. Kuipers, és W.P.M. van Swaaij. 1999. „A Three-Dimensional CFD Model for Gas-Liquid Bubble Columns”. *Chemical Engineering Science* 54 (13–14): 2217–26. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00362-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00362-5).
- Delnoij, E., F.A. Lammers, J.A.M. Kuipers, és W.P.M. van Swaaij. 1997. „Dynamic Simulation of Dispersed Gas-Liquid Two-Phase Flow Using a Discrete Bubble Model”. *Chemical Engineering Science* 52 (9): 1429–58. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(96\)00515-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(96)00515-5).

- Dhotre, M, és J Joshi. 2007. „Design of a Gas Distributor: Three-Dimensional CFD Simulation of a Coupled System Consisting of a Gas Chamber and a Bubble Column”. *Chemical Engineering Journal* 125 (3): 149–63. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.08.027>.
- Doods, Walter K. 1989. „Microscale Vertical Profiles of N₂ Fixation, Photosynthesis, O₂, Chlorophyll a, and Light in a Cyanobacterial Assemblage”. *Applied and Environmental Microbiology*. 55 (4): 882–886.
- Doucha, Jirí, František Straka, és Karel Lívanský. 2005. „Utilization of Flue Gas for Cultivation of Microalgae *Chlorella* Sp. in an Outdoor Open Thin-Layer Photobioreactor”. *Journal of Applied Phycology* 17 (5): 403–12. <https://doi.org/10.1007/s10811-005-8701-7>.
- Ekambara, K., Mahesh T. Dhotre, és Jyeshtharaj B. Joshi. 2005. „CFD Simulations of Bubble Column Reactors: 1D, 2D and 3D Approach”. *Chemical Engineering Science* 60 (23): 6733–46. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.05.047>.
- Fan, L.-H., Y.-T. Zhang, L.-H. Cheng, L. Zhang, D.-S. Tang, és H.-L. Chen. 2007. „Optimization of Carbon Dioxide Fixation by *Chlorella Vulgaris* Cultivated in a Membrane-Photobioreactor”. *Chemical Engineering & Technology* 30 (8): 1094–99. <https://doi.org/10.1002/ceat.200700141>.
- Fernandes, Bruno D., Giuliano M. Dragone, José A. Teixeira, és António A. Vicente. 2010. „Light Regime Characterization in an Airlift Photobioreactor for Production of Microalgae with High Starch Content”. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 161 (1–8): 218–26. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8783-9>.
- Fernández, I., F.G. Ación, J.L. Guzmán, M. Berenguel, és J.L. Mendoza. 2016. „Dynamic Model of an Industrial Raceway Reactor for Microalgae Production”. *Algal Research* 17: 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.021>.
- Gao, Xi, Bo Kong, és R. Dennis Vigil. 2016. „CFD Simulation of Bubbly Turbulent Taylor–Couette Flow”. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24 (6): 719–27. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.01.013>.
- Gimbin, Jolius. 2009. „Assessment of the turbulence models for modelling of bubble column”. *Journal of The Institution of Engineers Journal, Malaysia* 70 (4): 57–64.
- Glover, G. M. Cartland, S. C. Generalis, és N. H. Thomas. 2000. „CFD and Bubble Column Reactors: Simulation and Experiment”. *Chemical Papers* 54 (6a): 361–369.

- Goldman, Joel C. 1979. „Outdoor Algal Mass Cultures-II. Photosynthetic Yield Limitations”. *Water Research* 13 (2): 119–36. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90083-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90083-6).
- Grace, John R., és Fariborz Taghipour. 2004. „Verification and Validation of CFD Models and Dynamic Similarity for Fluidized Beds”. *Powder Technology* 139 (2): 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.10.006>.
- Griffiths, Melinda J., Clive Garcin, Robert P. van Hille, és Susan T.L. Harrison. 2011. „Interference by Pigment in the Estimation of Microalgal Biomass Concentration by Optical Density”. *Journal of Microbiological Methods* 85 (2): 119–23. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.02.005>.
- Grima, E. Molina, F. García Camacho, J. A. Sánchez Pérez, J. M. Fernández Sevilla, F. G. Acién Fernández, és A. Contreras Gómez. 1994. „A Mathematical Model of Microalgal Growth in Light-Limited Chemostat Culture”. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 61 (2): 167–73. <https://doi.org/10.1002/jctb.280610212>.
- Grobbelaar, Johan U. 2004. „Algal Nutrition - Mineral Nutrition”. In *Handbook of Microalgal Culture*, szerkesztette Amos Richmond, 95–115. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470995280.ch6>.
- Grobbelaar, Johan U., és N. Kurano. 2003. „Use of Photoacclimation in the Design of a Novel Photobioreactor to Achieve High Yields in Algal Mass Cultivation”. *Journal of Applied Phycology* 15 (2/3): 121–26. <https://doi.org/10.1023/A:1023802820093>.
- Grobbelaar, Johan U., Ladislav Nedbal, és Vladimír Tichý. 1996. „Influence of High Frequency Light/Dark Fluctuations on Photosynthetic Characteristics of Microalgae Photoacclimated to Different Light Intensities and Implications for Mass Algal Cultivation”. *Journal of Applied Phycology* 8 (4–5): 335–43. <https://doi.org/10.1007/BF02178576>.
- Gudin, Claude, és Daniel Chaumont. 1991. „Cell Fragility - The Key Problem of Microalgae Mass Production in Closed Photobioreactors”. *Bioresource Technology* 38 (2–3): 145–51. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90146-B](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90146-B).

- Hadiyanto, H., Steven Elmore, Tom Van Gerven, és Andrzej Stankiewicz. 2013. „Hydrodynamic Evaluations in High Rate Algae Pond (HRAP) Design”. *Chemical Engineering Journal* 217: 231–39. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.015>.
- Hanagata, Nobutaka, Toshifumi Takeuchi, Yoshiharu Fukuju, David J. Barnes, és Isao Karube. 1992. „Tolerance of Microalgae to High CO₂ and High Temperature”. *Phytochemistry* 31 (10): 3345–48. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(92\)83682-O](https://doi.org/10.1016/0031-9422(92)83682-O).
- Harder, R, és H von Witsch. 1942. „Über die Massenkultur von Diatomeen.” *Bericht Deutschen Botanischen Gesellschaft* 60 (11): 146-152.
- Hidalgo, P., C. Toro, G. Ciudad, és R. Navia. 2013. „Advances in Direct Transesterification of Microalgal Biomass for Biodiesel Production”. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 12 (2): 179–99. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9308-0>.
- Hirt, C.W., és B.D. Nichols. 1981. „Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”. *Journal of Computational Physics* 39 (1): 201–25. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- Hodai, Zoltán. 2014. „Alga biomassza kinyerése foto-bioreaktorokban termesztett mikroalga szuszpenziókból (Doktori (Ph.D.) értekezés)”. *Pannon Egyetem*, 1–189. <https://doi.org/10.18136/pe.2014.570>.
- Horváth, András, Christian Jordan, Michael Lukasser, Christian Kuttner, Aleksander Makaruk, és Michael Harasek. 2009. „CFD simulation of bubble columns using the VOL model - comparison of commercial and open source solvers with an experiment”. *Chemical Engineering Transactions* 18: 605–610. <https://doi.org/10.3303/CET0918098>.
- Hsieh, Chih-Hung, és Wen-Teng Wu. 2009. „Cultivation of Microalgae for Oil Production with a Cultivation Strategy of Urea Limitation”. *Bioresource Technology* 100 (17): 3921–26. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.019>.
- Huang, Qingshan, Chao Yang, Gengzhi Yu, és Zai-Sha Mao. 2010. „CFD Simulation of Hydrodynamics and Mass Transfer in an Internal Airlift Loop Reactor Using a Steady Two-Fluid Model”. *Chemical Engineering Science* 65 (20): 5527–36. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.07.021>.
- Huilin, Lu, He Yurong, és Dimitri Gidaspow. 2003. „Hydrodynamic Modelling of Binary Mixture in a Gas Bubbling Fluidized Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow”.

- Chemical Engineering Science* 58 (7): 1197–1205. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00635-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00635-8).
- Hutmacher, Dietmar W., és Harmeet Singh. 2008. „Computational Fluid Dynamics for Improved Bioreactor Design and 3D Culture”. *Trends in Biotechnology* 26 (4): 166–72. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.11.012>.
- Janssen, Marcel, Peter Slenders, Johannes Tramper, Luuc R. Mur, és René H. Wijffels. 2001. „Photosynthetic Efficiency of *Dunaliella Tertiolecta* under Short Light/Dark Cycles”. *Enzyme and Microbial Technology* 29 (4–5): 298–305. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00387-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00387-8).
- Janssen, Marcel, Johannes Tramper, Luuc R. Mur, és René H. Wijffels. 2003. „Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light Regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-up, and Future Prospects”. *Biotechnology and Bioengineering* 81 (2): 193–210. <https://doi.org/10.1002/bit.10468>.
- Joshi, J.B. 2001. „Computational Flow Modelling and Design of Bubble Column Reactors”. *Chemical Engineering Science* 56 (21–22): 5893–5933. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00273-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00273-1).
- Kirk, John T. O. 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 2nd ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kodama, M., H. Ikemoto, és S Miyachi. 1993. „A New Species of Highly CO₂-Tolerant Fast-Growing Marine Microalga Suitable for High-Density Culture”. *Journal of Marine Biotechnology* 1 (1): 21–25.
- Kommareddy, Anil, és Dr. Gary Anderson. 2003. „Study of Light as a Parameter in the Growth of Algae in a Photo-Bio Reactor (PBR)”. *Paper Number 034057, 2003 ASAE Annual Meeting* Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/2013.13868>.
- Kommareddy, Anil, és Gary Anderson. 2004. „Analysis of Currents and Mixing in a Modified Bubble Column Reactor”. *Paper Number 043071, 2004 ASAE Annual Meeting* Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/2013.17681>.

- Kommareddy, Anil R., és Gary A. Anderson. 2005. „Mechanistic Modeling of a Photobioreactor System.” *Paper Number 054167, 2005 ASAE Annual Meeting* Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/2013.20123>.
- Kong, Qingxue, Fei Yu, Paul Chen, és Roger Ruan. 2007. „High Oil Content Microalgae Selection for Biodiesel Production”. *2007 ASAE Annual Meeting 077034* Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/2013.23441>.
- Krishna, R., és J.M. van Baten. 1999. „Rise Characteristics of Gas Bubbles in a 2D Rectangular Column: VOF Simulations vs Experiments”. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 26 (7): 965–74. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(99\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(99)00086-X).
- Krishna, R., és J.M. van Baten. 2002. „Scaling up Bubble Column Reactors with Highly Viscous Liquid Phase”. *Chemical Engineering & Technology* 25 (10): 1015–20. [https://doi.org/10.1002/1521-4125\(20021008\)25:10<1015:AID-CEAT1015>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-4125(20021008)25:10<1015:AID-CEAT1015>3.0.CO;2-N).
- Krishna, R., J.M. van Baten, és M.I. Urseanu. 2000. „Three-Phase Eulerian Simulations of Bubble Column Reactors Operating in the Churn-Turbulent Regime: A Scale up Strategy”. *Chemical Engineering Science* 55 (16): 3275–86. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00582-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00582-5).
- Krishna, R., és J.M. Van Baten. 2001. „Scaling up Bubble Column Reactors with the Aid of CFD”. *Chemical Engineering Research and Design* 79 (3): 283–309. <https://doi.org/10.1205/026387601750281815>.
- Kristóf, Gergely. 2013. „Többfázisú áramlás modellezése - Órai előadás”. In . Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar. http://www.ara.bme.hu/neptun/BMEGEATMG02/2014-2015-I/ea/6_Tobbfazisu.pdf.
- Krys Bangert. 2013. „Photo-Bioreactor Modelling And Development Of Methods For The Optimisation Of Micro-algal Biodiesel Production”. Thesis (PhD), The University of Sheffield, UK, Department of Molecular Biology and Biotechnology Department of Chemical & Biological Engineering. <http://etheses.whiterose.ac.uk/5570/>.

- Laín, S., D. Bröder, és M. Sommerfeld. 2001. „Numerical simulations of the hydrodynamics in a bubble column: Quantitative Comparisons with experiments”. *Proc. of the 4th Int. Conf. on Multiphase Flow, New Orleans (USA), May 27 - June 1, ICM,F.*
- Larrucea Osorio, Silvia. 2010. „Computational fluid dynamic model of a thin layer cascading photobioreactor”. Master thesis (pre-Bologna period), Sapienza Univerzitá di Roma. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14675>.
- Lauder, Brian Edward, és Dudley Brian Spalding. 1972. *Lecture on Mathematical Models of Turbulence*. London; New York: Academic Press, London.
- Leavitt, P. R., D. L. Findlay, R. I. Hall, és J. P. Smol. 1999. „Algal responses to dissolved organic carbon loss and pH decline during whole-lake acidification: Evidence from paleolimnology”. *Limnology and Oceanography* 44 (3part2): 757–773. https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.3_part_2.0757.
- Lee, Jimin, Dae-Hyun Cho, Rishiram Ramanan, Byung-Hyuk Kim, Hee-Mock Oh, és Hee-Sik Kim. 2013. „Microalgae-Associated Bacteria Play a Key Role in the Flocculation of *Chlorella Vulgaris*”. *Bioresource Technology* 131: 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.130>.
- Lee, Yuan-Kun. 2001. „Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential”. *Journal of Applied Phycology* 13 (4): 307–315.
- Leib, Tiberiu M., Carmo J. Pereira, és John Villadsen. 2001. „Bioreactors: A Chemical Engineering Perspective”. *Chemical Engineering Science* 56 (19): 5485–97. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00173-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00173-7).
- Li, Ming, Dawei Hu, és Hong Liu. 2014. „Photobioreactor with Ideal Light–Dark Cycle Designed and Built from Mathematical Modeling and CFD Simulation”. *Ecological Engineering* 73: 162–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.010>.
- Li, Yanqun, Mark Horsman, Bei Wang, Nan Wu, és Christopher Q. Lan. 2008. „Effects of Nitrogen Sources on Cell Growth and Lipid Accumulation of Green Alga *Neochloris Oleoabundans*”. *Applied Microbiology and Biotechnology* 81 (4): 629–36. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1681-1>.

- Li, Yong, Jianping Zhang, és Liang-Shih Fan. 2000. „Discrete-Phase Simulation of Single Bubble Rise Behavior at Elevated Pressures in a Bubble Column”. *Chemical Engineering Science* 55 (20): 4597–4609. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00089-0).
- Lörstad, Daniel, és Laszlo Fuchs. 2004. „High-Order Surface Tension VOF-Model for 3D Bubble Flows with High Density Ratio”. *Journal of Computational Physics* 200 (1): 153–76. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.04.001>.
- Mandalam, Ramkumar K., és Bernhard Palsson. 1998. „Elemental Balancing of Biomass and Medium Composition Enhances Growth Capacity in High-Density *Chlorella Vulgaris* Cultures”. *Biotechnology and Bioengineering* 59 (5): 605–11. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980905\)59:5<605:AID-BIT11>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980905)59:5<605:AID-BIT11>3.0.CO;2-8).
- Massart, Amaury, Aldo Mirisola, Delphine Lupant, Diane Thomas, és Anne-Lise Hantson. 2014. „Experimental Characterization and Numerical Simulation of the Hydrodynamics in an Airlift Photobioreactor for Microalgae Cultures”. *Algal Research* 6 (Part B): 210–17. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.07.003>.
- Mata, Teresa M., António A. Martins, és Nidia. S. Caetano. 2010. „Microalgae for Biodiesel Production and Other Applications: A Review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1): 217–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>.
- Matsumoto, Hiroyo, Norio Shioji, Akihiro Hamasaki, és Yoshiaki Ikuta. 1996. „Basic Study on Optimization of Raceway-Type Algal Cultivator.” *Journal of Chemical Engineering of Japan* 29 (3): 541–43. <https://doi.org/10.1252/jcej.29.541>.
- Mehlitz, Thomas Hagen. 2009. „Temperature influence and heat management requirements of microalgae cultivation in photobioreactors”. Thesis, San Luis Obispo: Faculty of California Polytechnic State University. <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1061&context=theses>.
- Merchuk, J.C., M. Gluz, és I. Mukmenev. 2000. „Comparison of Photobioreactors for Cultivation of the Red Microalga *Porphyridium Sp*”. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 75 (12): 1119–26. [https://doi.org/10.1002/1097-4660\(200012\)75:12<1119:AID-JCTB329>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1097-4660(200012)75:12<1119:AID-JCTB329>3.0.CO;2-G).

- Merchuk, J.C., és X. Wu. 2003. „Modeling of Photobioreactors: Application to Bubble Column Simulation”. *Journal of Applied Phycology* 15 (2/3): 163–69. <https://doi.org/10.1023/A:1023879619535>.
- Michele, Volker, és Dietmar C. Hempel. 2002. „Liquid Flow and Phase Holdup-Measurement and CFD Modeling for Two-and Three-Phase Bubble Columns”. *Chemical Engineering Science* 57 (11): 1899–1908. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00051-9).
- Mirón, Asterio Sánchez, Antonio Contreras Gómez, Francisco García Camacho, Emilio Molina Grima, és Yusuf Chisti. 1999. „Comparative Evaluation of Compact Photobioreactors for Large-Scale Monoculture of Microalgae”. *Journal of Biotechnology* 70 (1–3): 249–70. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00079-6).
- Mirón, Asterio Sánchez, Antonio Contreras Gómez, F. García Camacho, E. Molina Grima, és Y. Chisti. 2004. „Mixing in Bubble Column and Airlift Reactors”. *Chemical Engineering Research and Design* 82 (10): 1367–74. <https://doi.org/10.1205/cerd.82.10.1367.46742>.
- Miura, Y., W. Yamada, K. Hirata, K. Miyamoto, és M. Kiyohara. 1993. „Stimulation of Hydrogen Production in Algal Cells Grown under High CO₂ Concentration and Low Temperature”. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 39–40 (1): 753–61. <https://doi.org/10.1007/BF02919033>.
- Miyairi, Sachio. 1995. „CO₂ Assimilation in a Thermophilic Cyanobacterium”. *Energy Conversion and Management* 36 (6–9): 763–66. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00116-U](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00116-U).
- Molina, E., J. Fernández, F.G. Acien, és Y. Chisti. 2001. „Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures”. *Journal of Biotechnology* 92 (2): 113–31. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00353-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00353-4).
- Molina Grima, E., F. G. Acien Fernández, F. García Camacho, és Yusuf Chisti. 1999. „Photobioreactors: Light Regime, Mass Transfer, and Scaleup”. *Journal of Biotechnology* 70 (1–3): 231–47. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00078-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00078-4).
- Morais, Michele Greque de, és Jorge Alberto Vieira Costa. 2007. „Carbon Dioxide Fixation by *Chlorella Kessleri*, *C. Vulgaris*, *Scenedesmus Obliquus* and *Spirulina Sp.* Cultivated in Flasks and Vertical Tubular Photobioreactors”. *Biotechnology Letters* 29 (9): 1349–52. <https://doi.org/10.1007/s10529-007-9394-6>.

- Mouza, K.A., N.A. Kazakis, és S.V. Paras. 2004. „Bubble column reactor design using a CFD code.” *1st International Conference From Scientific Computing to Computational Engineering* Athens, September 8–10.
- MSZ-08 0205-78. 1978. „Mezőgazdasági és Élelmezésügyi Ágazati Szabvány: A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata”. *MSZH Kiadó, Budapest*, 1–39.
- Nagase, Hiroyasu, Kaoru Eguchi, Ken-Ichi Yoshihara, Kazumasa Hirata, és Kazuhisa Miyamoto. 1998. „Improvement of Microalgal NO_x Removal in Bubble Column and Airlift Reactors”. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 86 (4): 421–23. [https://doi.org/10.1016/S0922-338X\(99\)89018-7](https://doi.org/10.1016/S0922-338X(99)89018-7).
- Nakano, Y., K. Miyatake, H. Okuno, K. Hamazaki, S. Takenaka, N. Honami, M. Kiyota, I. Aiga, és J. Kondo. 1996. „Growth of Photosynthetic Algae Euglena in High CO₂ Conditions and its Photosynthetic Characteristics”. *ISHS Acta Horticulturae*, sz. 440: 49–54. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.440.9>.
- Neményi, Miklós, Gábor Milics, Imre Tibor Tolner, Bálint Ambrus, Tamás Rétfalvi, és A. J. Kovács. 2015. „Contribution to the technological development of microalgae production in Hungary In: Ördög V, Molnár Z (szerk.) 7th Symposium on Microalgae and Seaweed Products in Plant/Soil-Systems "Contribution to Sustainable Agriculture. 71 p.” *Mosonmagyaróvár, Magyarország, 2015.06.29-2015.06.30.*, 44.
- Ninno, Matteo Power del. 2012. „Investigation of turbulent multiphase flows in a flat panel photobioreactor and consequent effects on microalgae cultivation; using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation and Particle Image Velocimetry (PIV) measurement”. In *Graduate Theses and Dissertations. Paper 12310.*, 51. Iowa State University Ames, Iowa.
- Olaizola, Miguel. 2003. „Commercial Development of Microalgal Biotechnology: From the Test Tube to the Marketplace”. *Biomolecular Engineering* 20 (4–6): 459–66. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00076-5).
- Oncel, S., és F. Vardar Sukan. 2008. „Comparison of Two Different Pneumatically Mixed Column Photobioreactors for the Cultivation of *Arthrospira Platensis* (*Spirulina Platensis*)”. *Bioresource Technology* 99 (11): 4755–60. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.068>.

- Oncel, Suphi S. 2015. „Biohydrogen from Microalgae, Uniting Energy, Life, and Green Future”. In *Handbook of Marine Microalgae*, 159–96. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00011-X>.
- Oncel, Suphi S., és Oguz Akpolat. 2006. „An integrated photobioreactor system for the production of *Spirulina platensis*”. *Biotechnology* 5 (3): 365–72. <https://doi.org/10.3923/biotech.2006.365.372>.
- Ono, Eiichi, és Joel L. Cuello. 2003. „Selection of optimal species for CO₂ sequestration. In: Second Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria, Virginia, USA, May 5–8.” <https://pdfs.semanticscholar.org/9b8e/65993b2a61f6957c9097feba8e369743aaba.pdf>.
- Ördög, Vince. 2014. „Mikroalgák biotechnológiai alkalmazása a növénytermesztésben és növényvédelemben”. Doktori Értekezés, Mosonmagyaróvár: Nyugat-magyarországi Egyetem Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar Növénybiológiai Intézet. http://real-d.mtak.hu/765/42/dc_881_14_doktori_mu.pdf.
- Ördög, Vince, Wendy A. Stirk, Péter Bálint, Adeyemi O. Aremu, Ambrose Okem, Csaba Lovász, Zoltán Molnár, és Johannes van Staden. 2016. „Effect of Temperature and Nitrogen Concentration on Lipid Productivity and Fatty Acid Composition in Three *Chlorella* Strains”. *Algal Research* 16: 141–49. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.001>.
- Panda, A.K., Saroj Mishra, V.S. Bisaria, és S.S. Bhojwani. 1989. „Plant Cell Reactors - A Perspective”. *Enzyme and Microbial Technology* 11 (7): 386–97. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(89\)90132-4](https://doi.org/10.1016/0141-0229(89)90132-4).
- Patil, Vishwanath, Khanh-Quang Tran, és Hans Ragnar Giselrød. 2008. „Towards Sustainable Production of Biofuels from Microalgae”. *International Journal of Molecular Sciences* 9 (7): 1188–95. <https://doi.org/10.3390/ijms9071188>.
- Pedersen, Maria FengerFengen, és Per Juel Hansen. 2003. „Effects of High PH on the Growth and Survival of Six Marine Heterotrophic Protists”. *Marine Ecology Progress Series* 260: 33–41. <https://doi.org/10.3354/meps260033>.
- Perner, I., C. Posten, és J. Broneske. 2003. „CFD Optimization of a Plate Photobioreactor Used for Cultivation of Microalgae”. *Engineering in Life Sciences* 3 (7): 287–91. <https://doi.org/10.1002/elsc.200302964>.

- Perner-Nochta, Iris, és Clemens Posten. 2007. „Simulations of Light Intensity Variation in Photobioreactors”. *Journal of Biotechnology* 131 (3): 276–85. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.05.024>.
- Pfleger, D., S. Gomes, N. Gilbert, és H.-G. Wagner. 1999. „Hydrodynamic Simulations of Laboratory Scale Bubble Columns Fundamental Studies of the Eulerian–Eulerian Modelling Approach”. *Chemical Engineering Science* 54 (21): 5091–99. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00261-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00261-4).
- Pinckney, J., és R. G. Zingmark. 1993. „Photophysiological Responses of Intertidal Benthic Microalgal Communities to in Situ Light Environments: Methodological Considerations”. *Limnology and Oceanography* 38 (7): 1373–83. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.7.1373>.
- Piorreck, Margret, Klaus-Hinnerk Baasch, és Peter Pohl. 1984. „Biomass Production, Total Protein, Chlorophylls, Lipids and Fatty Acids of Freshwater Green and Blue-Green Algae under Different Nitrogen Regimes”. *Phytochemistry* 23 (2): 207–16. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)80304-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)80304-0).
- Posten, Clemens. 2009. „Design Principles of Photo-Bioreactors for Cultivation of Microalgae”. *Engineering in Life Sciences* 9 (3): 165–77. <https://doi.org/10.1002/elsc.200900003>.
- Pramparo, Laura, Jeremy Pruvost, Frank Stüber, Josep Font, Agustí Fortuny, Azael Fabregat, Patrick Legentilhomme, Jack Legrand, és Christophe Bengoa. 2008. „Mixing and Hydrodynamics Investigation Using CFD in a Square-Sectioned Torus Reactor in Batch and Continuous Regimes”. *Chemical Engineering Journal* 137 (2): 386–95. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.013>.
- Pruvost, J., L. Pottier, és J. Legrand. 2006. „Numerical Investigation of Hydrodynamic and Mixing Conditions in a Torus Photobioreactor”. *Chemical Engineering Science* 61 (14): 4476–89. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.027>.
- Pulz O. 2001. „Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms”. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57 (3): 287–93. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>.

- Pulz, Otto, és Wolfgang Gross. 2004. „Valuable Products from Biotechnology of Microalgae”. *Applied Microbiology and Biotechnology* 65 (6): 635–48. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>.
- Rampure, Mohan R., Amol A. Kulkarni, és Vivek V. Ranade. 2007. „Hydrodynamics of Bubble Column Reactors at High Gas Velocity: Experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulations”. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46 (25): 8431–47. <https://doi.org/10.1021/ie070079h>.
- Ranade, V.V., és Y. Tayalia. 2001. „Modelling of Fluid Dynamics and Mixing in Shallow Bubble Column Reactors: Influence of Sparger Design”. *Chemical Engineering Science* 56 (4): 1667–75. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00395-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00395-X).
- Ranjbar, Reza, Ryota Inoue, Tomohisa Katsuda, Hideki Yamaji, és Shigeo Katoh. 2008. „High Efficiency Production of Astaxanthin in an Airlift Photobioreactor”. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 106 (2): 204–7. <https://doi.org/10.1263/jbb.106.204>.
- Reyna-Velarde, Rodolfo, Eliseo Cristiani-Urbina, Dulce Jazmin Hernández-Melchor, Frédéric Thalasso, és Rosa Olivia Cañizares-Villanueva. 2010. „Hydrodynamic and Mass Transfer Characterization of a Flat-Panel Airlift Photobioreactor with High Light Path”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49 (1): 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.11.014>.
- Richmond, A., E. Lichtenberg, B. Stahl, és A. Vonshak. 1990. „Quantitative Assessment of the Major Limitations on Productivity of *Spirulina Platensis* in Open Raceways”. *Journal of Applied Phycology* 2 (3): 195–206. <https://doi.org/10.1007/BF02179776>.
- Richmond, Amos, szerk. 2004. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford, OX, UK; Ames, Iowa, USA: Blackwell Science.
- Richmond, Amos, Zhang Cheng-Wu, és Yair Zarmi. 2003. „Efficient Use of Strong Light for High Photosynthetic Productivity: Interrelationships between the Optical Path, the Optimal Population Density and Cell-Growth Inhibition”. *Biomolecular Engineering* 20 (4–6): 229–36. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00060-1).
- Rodolfi, Liliana, Graziella Chini Zittelli, Niccolò Bassi, Giulia Padovani, Natascia Biondi, Gimena Bonini, és Mario R. Tredici. 2009. „Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction

- of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor”. *Biotechnology and Bioengineering* 102 (1): 100–112. <https://doi.org/10.1002/bit.22033>.
- Rosello Sastre, Rosa, Zsuzsa Csögör, Iris Perner-Nochta, Pascale Fleck-Schneider, és Clemens Posten. 2007. „Scale-down of Microalgae Cultivations in Tubular Photobioreactors - A Conceptual Approach”. *Journal of Biotechnology* 132 (2): 127–33. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.04.022>.
- Rubio, F. Camacho, F. Garcia Camacho, J. M. Fernández Sevilla, Y. Chisti, és E. Molina Grima. 2003. „A Mechanistic Model of Photosynthesis in Microalgae”. *Biotechnology and Bioengineering* 81 (4): 459–73. <https://doi.org/10.1002/bit.10492>.
- Santos, Celso M dos, Renato Dionisio, Henrique S Cerqueira, Eduardo F Sousa-Aguar, Milton Mori, és Marcos A d’Avila. 2007. „Three-Dimensional Gas-Liquid CFD Simulations in Cylindrical Bubble Columns”. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 5 (1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1620>.
- Sanyal, Jayanta, Sergio Vásquez, Shantanu Roy, és M.P. Dudukovic. 1999. „Numerical Simulation of Gas-Liquid Dynamics in Cylindrical Bubble Column Reactors”. *Chemical Engineering Science* 54 (21): 5071–83. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00235-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00235-3).
- Sato, Toru, Daiki Yamada, és Shinichiro Hirabayashi. 2010. „Development of Virtual Photobioreactor for Microalgae Culture Considering Turbulent Flow and Flashing Light Effect”. *Energy Conversion and Management* 51 (6): 1196–1201. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.030>.
- Sawayama, S., S. Inoue, és S. Yokoyama. 1994. „Continuous Culture of Hydrocarbon-Rich Microalga *Botryococcus Braunii* in Secondarily Treated Sewage”. *Applied Microbiology and Biotechnology* 41 (6): 729–31. <https://doi.org/10.1007/BF00167292>.
- Seckbach, J., H. Gross, és M.B. Nathan. 1971. „Growth and photosynthesis of *Cyanidium caldarium* cultured under pure CO₂”. *Israel Journal of Botany* 20: 84–90.
- Seo, I.H., I.H. Lee, S.H. Hwang, S.W. Hong, J.P. Bitog, K.S. Kwon, J.S. Choi, és S.H. Song. 2010. „Numerical investigation of a bubble-column photo-bioreactor design for biodiesel production from microalgae.” *Proceedings of the XVIIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering CIGR*, Quebec City, Canada, June 13–17.

- Seo, Il-Hwan, In-Bok Lee, Se-Woon Hong, Jessie P. Bitog, Kyeong-Seok Kwon, Choul-Gyun Lee, és Z-Hun Kim. 2014. „Evaluation of a Photobioreactor Performance Grafting Microalgal Growth Model and Particle Tracking Technique Using CFD”. *Transactions of the ASABE* 57 (1): 121–39. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10339>.
- Serra-Maia, Rui, Olivier Bernard, Ana Gonçalves, Sakina Bensalem, és Filipa Lopes. 2016. „Influence of Temperature on *Chlorella Vulgaris* Growth and Mortality Rates in a Photobioreactor”. *Algal Research* 18: 352–59. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.016>.
- Sheehan, J., T. Dunahay, J. Benemann, és P. Roessler. 1998. „Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report”. *NREL/TP-580-24190* U.S. Department of Energy’s Office of Fuels Development. <https://doi.org/doi:10.2172/15003040>.
- Sierra, E., F.G. Acién, J.M. Fernández, J.L. García, C. González, és E. Molina. 2008. „Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae”. *Chemical Engineering Journal* 138 (1–3): 136–47. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.004>.
- Simonnet, M., C. Gentric, E. Olmos, és N. Midoux. 2008. „CFD Simulation of the Flow Field in a Bubble Column Reactor: Importance of the Drag Force Formulation to Describe Regime Transitions”. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 47 (9–10): 1726–37. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.08.015>.
- Singh, S.P., és Priyanka Singh. 2015. „Effect of Temperature and Light on the Growth of Algae Species: A Review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50: 431–44. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>.
- Su, Zhenfeng, Ruijuan Kang, Shaoyuan Shi, Wei Cong, és Zhaoling Cai. 2010. „Study on the Destabilization Mixing in the Flat Plate Photobioreactor by Means of CFD”. *Biomass and Bioenergy* 34 (12): 1879–84. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.025>.
- Suh, In Soo, Hyun-Na Joo, és Choul-Gyun Lee. 2006. „A Novel Double-Layered Photobioreactor for Simultaneous *Haematococcus Pluvialis* Cell Growth and Astaxanthin Accumulation”. *Journal of Biotechnology* 125 (4): 540–46. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2006.03.027>.

- Suh, In Soo, és Choul-Gyun Lee. 2003. „Photobioreactor Engineering: Design and Performance”. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 8 (6): 313–21. <https://doi.org/10.1007/BF02949274>.
- Sung, K, Jin-Suk Lee, Chul-Seung Shin, Soon-Chul Park, és Myung-Jae Choi. 1999. „CO₂ Fixation by *Chlorella* Sp. KR-1 and Its Cultural Characteristics”. *Bioresource Technology* 68 (3): 269–73. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00152-7).
- Szafran, Roman G., és Andrzej Kmiec. 2004. „Application of CFD Modelling Technique in Engineering Calculations of Three-Phase Flow Hydrodynamics in a Jet-Loop Reactor”. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 2, Article A30. <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1179>.
- Terry, Kenneth L., és Lawrence P. Raymond. 1985. „System Design for the Autotrophic Production of Microalgae”. *Enzyme and Microbial Technology* 7 (10): 474–87. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(85\)90148-6](https://doi.org/10.1016/0141-0229(85)90148-6).
- Thakre, S.S., és J.B. Joshi. 1999. „CFD Simulation of Bubble Column Reactors: Importance of Drag Force Formulation”. *Chemical Engineering Science* 54 (21): 5055–60. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00232-8).
- Thomas, William H., és Carl H. Gibson. 1990. „Effects of Small-Scale Turbulence on Microalgae”. *Journal of Applied Phycology* 2 (1): 71–77. <https://doi.org/10.1007/BF02179771>.
- Tomaselli, Luisa. 2004. „The Microalgal Cell”. In *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, szerkesztette Amos Richmond, 1–19. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470995280.ch1>.
- Tredici, Mario R., Liliana Rodolfi, Natascia Biondi, Niccolò Bassi, és Giacomo Sampietro. 2016. „Techno-Economic Analysis of Microalgal Biomass Production in a 1-Ha Green Wall Panel (GWP®) Plant”. *Algal Research* 19: 253–63. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.005>.
- Trujillo, Francisco J., Tomasz Safinski, és Adesoji A. Adesina. 2007. „CFD Analysis of the Radiation Distribution in a New Immobilized Catalyst Bubble Column Externally Illuminated Photoreactor”. *Journal of Solar Energy Engineering* 129 (1): 27–36. <https://doi.org/10.1115/1.2391013>.

- Tsuzuki, M., E. Kenjo, T. Takaku, S. Miyachi, és A. Kawaguchi. 1989. „Effects of CO₂ Concentration During Growth on Fatty Acid Composition in *Chlorella Vulgaris* 11H”. In *Biological Role of Plant Lipids*, szerkesztette Péter A. Biacs, Katalin Gruiz, és Tibor Kremmer, 549–52. Boston, MA: Springer US. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-1303-8_123.
- Ugwu, C.U., H. Aoyagi, és H. Uchiyama. 2008. „Photobioreactors for Mass Cultivation of Algae”. *Bioresource Technology* 99 (10): 4021–28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>.
- Vandamme, Dries, Imogen Foubert, Ilse Fraeye, Boudewijn Meesschaert, és Koenraad Muylaert. 2012. „Flocculation of *Chlorella Vulgaris* Induced by High PH: Role of Magnesium and Calcium and Practical Implications”. *Bioresource Technology* 105: 114–19. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.105>.
- Végvári, Zsolt. 2015. „A LED-ek alkalmazásának lehetőségei a magyar honvédségben. A villamos világítás jövője a LED-es fényforrások katonai alkalmazásának kérdései”. *Katonai logisztika* 23 (1): 133–62.
- Vinayak, Vandana, Kalina Manoylov, Hélène Gateau, Vincent Blanckaert, Josiane Hérault, Gaëlle Pencreac’h, Justine Marchand, Richard Gordon, és Benoît Schoefs. 2015. „Diatom Milking: A Review and New Approaches”. *Marine Drugs* 13 (5): 2629–65. <https://doi.org/10.3390/md13052629>.
- Wetzel, Robert G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3rd edition. San Diego: Academic Press.
- Wild, Gabriel, Souhila Poncin, Huai-Zhi Li, és Eric Olmos. 2003. „Some Aspects of the Hydrodynamics of Bubble Columns”. *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 1 (1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1095>.
- Yoo, J.I., I.B. Lee, H.S. Hwang, S.W. Hong, I.H. Seo, Jessie Pascual P. Bitog, K.S. Kwon, és Y.H. Kim. 2009a. „Design of a Bubble-column Photobioreactor for Growing Microalgae Using CFD Simulation. In: Agricultural Technologies In a Changing Climate: The 2009 CIGR International Symposium of the Australian Society for Engineering in Agriculture. Brisbane, Queensland: Engineers Australia”, 443–49. <https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=643192516475826;res=IELEN G>.

- Yoo, J.I., I.B. Lee, H.S. Hwang, S.W. Hong, I.H. Seo, J.P. Bitog, K.S. Kwon, és Y.H. Kim. 2009b. „Utilization of CFD Simulation Model for a Bubble Column Photobioreactor”. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 51 (5): 1–8. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2009.51.5.001>.
- Yoshihara, Ken-Ichi, Hiroyasu Nagase, Kaoru Eguchi, Kazumasa Hirata, és Kazuhisa Miyamoto. 1996. „Biological Elimination of Nitric Oxide and Carbon Dioxide from Flue Gas by Marine Microalga NOA-113 Cultivated in a Long Tubular Photobioreactor”. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 82 (4): 351–54. [https://doi.org/10.1016/0922-338X\(96\)89149-5](https://doi.org/10.1016/0922-338X(96)89149-5).
- Yoshimoto, Naohiro, Toru Sato, és Yutaka Kondo. 2005. „Dynamic Discrete Model of Flashing Light Effect in Photosynthesis of Microalgae”. *Journal of Applied Phycology* 17 (3): 207–14. <https://doi.org/10.1007/s10811-005-7908-y>.
- Yu, Gang, Yuanguang Li, Guomin Shen, Weiliang Wang, Chen Lin, Hongxi Wu, és Zhisheng Chen. 2009. „A Novel Method Using CFD to Optimize the Inner Structure Parameters of Flat Photobioreactors”. *Journal of Applied Phycology* 21 (december): 719–27. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9407-z>.
- Yun, Yeoung-Sang, és Jong Moon Park. 2003. „Kinetic Modeling of the Light-Dependent Photosynthetic Activity of the Green Microalga *Chlorella Vulgaris*”. *Biotechnology and Bioengineering* 83 (3): 303–11. <https://doi.org/10.1002/bit.10669>.
- Zhang, Dongda, Pongsathorn Dechatiwongse, és Klaus Hellgardt. 2015. „Modelling Light Transmission, Cyanobacterial Growth Kinetics and Fluid Dynamics in a Laboratory Scale Multiphase Photo-Bioreactor for Biological Hydrogen Production”. *Algal Research* 8: 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.01.006>.
- Zhang, Kai, Norihide Kurano, és Shigetoh Miyachi. 2002. „Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor”. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 25 (2): 97–101. <https://doi.org/10.1007/s00449-002-0284-y>.
- Zhao, Bingtao, Yixin Zhang, Kaibin Xiong, Zhongxiao Zhang, Xiaohong Hao, és Tao Liu. 2011. „Effect of Cultivation Mode on Microalgal Growth and CO₂ Fixation”. *Chemical Engineering Research and Design* 89 (9): 1758–62. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.02.018>.

Zou, Ning, és A. Richmond. 2000. „Light-path length and population density in photoacclimation of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae)”. *Journal of Applied Phycology* 12 (3–5): 349–354. <https://doi.org/10.1023/A:1008151004317>.

Zuber, N., és J. A. Findlay. 1965. „Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems”. *Journal of Heat Transfer* 87 (4): 453–68. <https://doi.org/10.1115/1.3689137>.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Általános szaporodási görbe	22
2. ábra P-I görbe jellemző adatai	23
3. ábra Fényhasznosító molekulák abszorpciós görbéje, és az összegükből származtatható viszonylagos fotoszintetikus aktivitás aránya	24
4. ábra Alganövekedés különböző hőmérsékletek mellett.....	26
5. ábra A tervezés és az élettani hatások kapcsolata	29
6. ábra PBR tervezési paraméterek	29
7. ábra a függőleges panel („Green Wall Panel” GWP) és annak dönthető változata.....	30
8. ábra A leggyakoribb zárt PBR geometriák; A) Síklap reaktor, B) buborék oszlop, itt gyűrűs reaktor, C) cső reaktor; Más geometriák összeállíthatók ezen alapgeometriákból.	31
9. ábra Többkomponensű (multispecies) áramlások lehetséges formái	35
10. ábra A vízszintes folyadék sebességének idősorai a buborékoszlop középpontjában.	40
11. ábra Az előjelzett víz-tengelyirányú sebességprofilok összehasonlítása a csőcsonkban 215 mm távolságra a kivezető nyílástól a különböző turbulencia modellekhez, kísérleti adatokkal.....	41
12. ábra Buborékoszlopban működő háromfázisú modell turbulens rendszerben,	43
13. ábra A gáz felületi sebessége két-dimenziós hatása a buborékméret-eloszlásra.	44
14. ábra A szimulált és a kísérleti sebességek különböző nyomások mellett.....	45
15. ábra Az alga növekedése a megvilágított faltól a megvilágítás függvényében	45
16. ábra LED valamint Neon világítás hatása a termelékenységre.....	47
17. ábra A nap és a leggyakoribb mesterséges fényforrások spektrumának összehasonlítása a látható fény tartományában.....	47
18. ábra 2D és 3D CFD Eulerian-Eulerian szimulációja	49
19. ábra A rácsméret hatása a gáztartalomra és axiális folyadéksebességre	50
20. ábra A korábbi GOP projekt „O” valamint „U” alakú összeszerelt elrendezései	55
21. ábra Korábbi „O” valamint „U” elrendezésű hurokreaktor összehasonlító méretezett rajza	56
22. ábra Az átmenő és a szórt fényáram mérése	57
23. ábra Tovább fejlesztett „O” alakú elrendezés	58
24. ábra Szűrőbetétek	59
25. ábra Kivezető csonk táglási tartállyal.....	60
26. ábra Levegőelosztás egységei.....	61

27. ábra Ülepítőtartályos, leeresztő csonk.....	61
28. ábra Kétoldal átmenő fényáram mérés	62
29. ábra pH és nyomásmérő.....	62
30. ábra Az ANSYS WORKBENCH, projekt kezelőfelülete.....	63
31. ábra Az ANSYS DESIGN MODELLER kezelőfelülete.....	64
32. ábra A Háló (Mesh) modell.....	65
33. ábra ANSYS FLUENT.....	66
34. ábra „Hőálló” (max 120°C) tárolóedény.....	70
35. ábra Algatermesztő berendezésben és mixture modellben uralkodó áramlási viszonyok összehasonlítása	75
36. ábra Buborékképződés modellezése.....	77
37. ábra A Chlorella vulgaris spektruma és a fényhasznosító molekulák abszorpciós görbéjének összehasonlítása	79
38. ábra A csúcsok (434, 480 és 676 nm környezetében) és völgyek (582 és 740 nm környezetében) gyakoriság diagramjai.....	81
39. ábra Az abszorbancia csúcsok (434, 480 és 676 nm) és az algakoncentráció összefüggései.	82
40. ábra Az abszorbancia csúcsok (434, 480 és 676 nm) és az algakoncentráció együttesen számolt összefüggése.	83
41. ábra 676 nm-en mért és számított adatokra az illeszkedés jószágát jellemző eltérésnégyzet összegek az abszorbancia függvényében.	84
42. ábra Az abszorbancia völgyek (740 és 555 nm) és az algakoncentráció összefüggései. .	85
43. ábra Átmenő (kék) és visszavert (okker) fény intenzitás a PBR-ben a 2017.07.05.- indulást követő 07.06-07.12. időszakban.....	87
44. ábra Átmenő és szórt fény intenzitás összefüggése	88
45. ábra Átmenő és szórt fény intenzitás összefüggése nagy algasűrűség esetén.....	89
46. ábra 2017.07.06-10.06 mérési időszakra vonatkozó szenzoradatok (átmenő μ W (kék) és szórt μ W (piros) fényintenzitás, pH (zöld), hőmérséklet (okker), a gázbetáplálás nyomása mbar (fekete), mintavétel (barna függőleges vonal))	90
47. ábra Átmenő fényintenzitás és tömeg kapcsolata (bal oldali detektor) 2017 évben.....	91
48. ábra A szórt fényintenzitás és tömeg kapcsolata (bal oldali detektor) 2017 évben	92
49. ábra Átmenő fényintenzitás és az algakoncentráció kapcsolata (bal oldali detektor) 2018 évben.....	93

50. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (bal oldali detektor) 2018 évben.....	94
51. ábra Átmenő fényintenzitás és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2018 évben.....	95
52. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2018 évben.....	96
53. ábra Átmenő fényintenzitás reciproka és az algakoncentráció kapcsolata (jobb oldali detektor) 2017 évben.....	97
54. ábra Átmenő fény intenzitás és számított algakoncentráció az idő függvényében.....	99
55. ábra A főáramból (kék) és a mintavevő leeresztő csonkból (piros) vett algakoncentrációk (2017)	100
56. ábra Az eredeti hurokreaktorban (2017) az adott napig eltávolított algamennyiség (g).	101
57. ábra A főáramból (kék) és a továbbfejlesztett leeresztő csonkból (piros) vett algakoncentrációk (2018).....	102
58. ábra A módosított hurokreaktorban az adott napig eltávolított algamennyiség (g).	103

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat A CO ₂ optimális, maximális felvevőképessége különböző mikroalga fajoknál ...	26
2. táblázat Különböző fúvókák összehasonítás	74
3. táblázat Mixture és a VOF modell összehasonlítása	76
4. táblázat Mikroalgák, más kutatók által vizsgált Biomasszatömeg meghatározására alkalmas jellemző hullámhosszak	80

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

JELÖLÉS	MAGYARÁZAT
abs	abszorbancia (A) $A = -\lg(T) = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$
A_G [m²]	a reaktor alapterülete, ahonnan a fényenergiát gyűjti
A_R [m²] vagy ha	a reaktor fényátereszt részének a teljes felülete
I	a fényintenzitás, megvilágítás, vagy foton áramlás sűrűség $\left[\frac{\mu \cdot E}{m^2 \cdot s}\right]$
I₀	a (reaktor felületi) besugárzás vagy foton áramlás sűrűsége $\left[\frac{\mu \cdot E}{m^2 \cdot s}\right]$
I_I	a megvilágítás kiegyenlítő energia, ami szükséges a növekedéshez $\left[\frac{\mu \cdot E}{m^2 \cdot s}\right]$
I_k	fényadaptációs paraméter
I_R	beeső fény intenzitás
P	fotoszintetikus aktivitás
P_{max}	maximális fotoszintézis
PCE (Photo- Chemical- Efficiency)	a fotokémiai átalakításának hatékonysága Az elméleti maximális értéke a becslések szerint 9% (Rodolfi és mtsai. 2009) a teljes napfényben.
P_G	területi termelékenység $P_G = \frac{dm_X}{A_G \cdot dt_C} \left[\frac{g}{m^2 \cdot d}\right] = \left[3,65 \frac{t}{ha \cdot a}\right]$
P_{max}	fotoszintetikus aktivitás maximuma a fényadaptációs paraméternél
P_R	térfogati termelékenység: $P_R = \frac{dm_X}{V_R \cdot dt_C} \left[\frac{g}{L \cdot d}\right]$

JELÖLÉS	MAGYARÁZAT
SVR (Surface Volume Ratio)	felületi térfogatarány
U	felületi gázsebesség, [m/s]
U _g	gázsebesség, [cm/s]
U _b	buboréksebesség, [cm/s]
U _{trans}	felületi gázsebesség a rendszer átmeneti pontja és a levegő víz között [m/s].
U _{cl}	középvonali sebesség buboréksebesség, [m/s]
V _R	A reaktor teljes üzemi térfogata [liter], amely magában foglalja a folyadék és a gáz fázist, a tiszta folyadék térfogata, amit általában nem adnak meg, ami szükséges lehet a tömeg kiegyensúlyozására.
α	fényhasznosítási tényező
β	fotoinhibíciós paraméter
λ	hullámhossz [nm]
Q _i	tömegszázalék [m/V %]
φ _i	térfogatszázalék [V/V %]
μ	specifikus növekedési ráta [$\frac{1}{h}$]

KIFEJEZÉSEK JEGYZÉKE

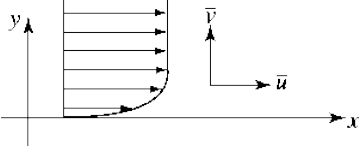
KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
<i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	A számítógépes folyadékdinamika a folyadékok áramlástanai problémáinak, tömeg, energia és impulzus áramok, illetve az egyéb részleteket leíró matematikai modelleket leíró egyenletek, megoldása numerikusan, számítógépes algoritmusokkal.
<i>Dispersed flow</i>	A diszperz áramlás: A diszperz áramlást egységes fázis eloszlás jellemez mind a radiális és axiális irányban. Ilyen a buborék [Bubble flow] áramlás és a köd [Mist flow] folyadék áramlás.
<i>Eulerian modell</i>	A fázisok elkülönült, de egymással elkeveredett formában vannak jelen, mozgásukat különálló mozgásegyenlet írja le. A fázisok közötti kölcsönhatás (a mozgásegyenletekben megjelenő) fázis-csatoló tagokkal vehető figyelembe.
<i>Flat plate PBR</i>	Plexiből vagy üvegből készült zártrendszerű vízszintes, függőleges vagy ferde elrendezésű, lapos (maximum 5cm) Algatermesztő berendezések összessége. Az alga keveredést, keringtetést, rendszerint Levegő CO ₂ keverék befúvatásával oldják meg.
<i>gas hold-up</i>	Magyar szinonimái: gáz elnyelés, gázemelés, gáztartás, gáz visszatartás, feltartóztatás, torlaszképző, buborék emelés, gáz térfogatarány, térfogatnövelő gázhányad a folyadékban. A gáz hold-up meghatározható úgy, mint a gázbuborékok teljes mennyisége a folyadékban bármely időpillanatban a gáz-folyadék fázisok érintkezési folyamatai során. A gáz hold-up -ot gázbuborékok alkotják, amelyek, lehetnek nagy, vagy akár mikroszkopikus méretű buborékok is. Hosszú ideig

KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
	<p>tartó gáz hold-up hatására a fermentorban összes buborék egyetlen nagy buborékká egyesül, egy statikus üres területet alkotva a fermentlében. Ez a folyamat akaratlanul is térfogatnövekedéshez vezethet (gázmentes fermentor térfogatához képest) amit okozhat:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elégtelen gáz felemelkedés és szétrobbanás fermentor fejrésében. - A buborékok túl kicsik és recirkulálnak a fermentlében bizonyos ideig - A habban a gázbuborékok csapdában vannak - A többlet gázképződés eredménye a gázbuborékok feldúsulása - A túl sűrű fermentlé nagyobb nyomást gyakorol az emelkedő gázbuborékokra. <p>Elméletileg, a sok gázbuborék jó, mert sok levegőt tárol vagy szállít, amely képes, belediffundálni a fermentlébe. De valóság teljesen más:</p> <ul style="list-style-type: none"> - A nagy buborékok kisebb felülete, egy a hab vagy felületaktív anyag vastag bevonata csökkenteni fogja az oxigén anyagátadás a hatékonyságát a környező fermentlébe. - A pangó buborékok környezetében lévő a fermentlében élő mikroorganizmusok elhasználják az oxigént és elhasznált salakanyagok felhalmozódnak, ezáltal toxikus gócpontok jönnek létre. - Továbbá a gáz hold-up által a fermentor fejrésében létrejövő habosodás a fertőzések esélyét is növeli.

KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
	<p>A gáz hold-up által a fermentlé felszínén bekövetkező habosodást eredményezheti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mikrobiális sejteket szeparálódása a fermentlében - A sejtek halála és roncsolódása a habban - Más szilárd anyagok és a tápanyagok elkülönülése a fermentlében - A tömegáram kedvezőtlen szabályozása - Növekedés a falakon <p>Gyenge pH szabályozás</p>
INLET	<p>FLUENT rendszerben a belépő peremfeltételek megadásakor lehetőség van k, ε és ω peremfeltételeinek I (turbulens intenzitás, turbulencia fok) és L vagy I és D_h hidraulikai átmérő alapján történő közvetlen megadására is. Meg kell említeni, hogy ezek az egyszerű megadási módok k, ε és ω belépő peremfeltételeit konstans profilok formájában írják elő.</p> <p>Turbulens intenzitás: $I = \frac{u'}{\bar{u}}$</p> <p>Nagyon csendes áramlás: $I < 1\%$</p> <p>Nagyon zajos áramlás: $I > 10\%$</p> <p>Csatornaáramlás magjában: $I \cong \frac{0.16}{\sqrt[3]{Re}}$</p> <p>$L$ hosszlépték becslése:</p> <p>Perforált lemez mögött: - a lyukméret</p> <p>Kis akadály mögött: - az akadály mérete</p> <p>Csatornaáramlás magjában: - $0.07D$</p> <p>Turbulens jellemzők becslése: $\mu_t \cong 1.22 \cdot \rho \cdot \bar{u} \cdot I \cdot L$</p> <p>Nagyon csendes áramlás: $k \cong 1.5 \cdot \bar{u}^2 \cdot I^2$</p>

KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
<p><i>k-ε</i> (<i>turbulencia</i>) <i>modell</i></p>	<p>Nagyon zajos áramlás: $\varepsilon \cong C_{\mu}^{0.75} \cdot k^{1.5} \cdot L^{-1}$</p> <p>Csatornaáramlás magjában: $\omega \cong C_{\mu}^{-0.25} \cdot k^{0.5} \cdot L^{-1}$</p> <p>Transzport egyenletre épülő Reynolds átlagolt (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) modell</p> <p>A standard k-ε modell szerint ε egy k egyenletéhez teljesen hasonló transzportegyenlettel írható le, mivel ε szintén turbulens örvénylés egy jellemzője (Lauder és Spalding 1972): $\frac{d\varepsilon}{dt} = C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$</p> <p>A modell konstansok, meghatározása mérési adatok illesztésével: $C_{1\varepsilon} = 1.44 ; C_{2\varepsilon} := 1.92$</p>
<p><i>k-ω</i> (<i>turbulencia</i>) <i>modell</i></p>	<p>Transzport egyenletre épülő Reynolds átlagolt (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) modell</p> <p>A határreteg lamináris-turbulens átmenete (két változatával k-kl-ω és Transition-k-ω-SST).</p> <p>Az SST modell változat valójában a határreteget a határretegen kívül pedig k-ε modellt old meg.</p>
<p><i>Lagrangia</i> <i>n Discrete</i> <i>Phase</i> <i>Modell</i> <i>(DPM)</i></p>	<p>A diszkrét fázis modellben szemcsék pillanatnyi helyzetét és sebességét határozzuk meg.</p> <p>Ha az egyes szemcsék (egyedi) követése nem lehetséges, „szemcsecsoportokat” képezhetünk, melyben a közvetett aggregátum nagyszámú hasonló tulajdonságú szemcsét reprezentál.</p> <p>A folytonos fázissal 1, 2, 3 vagy 4 irányú kapcsolat lehetséges. sűrű áramlás esetén a szemcsék közötti ütközések is figyelembe vehetők.</p>

KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
<i>Large Eddy Simulation LES (turbulencia) modell</i>	A nagy örvény szimuláció A turbulens mozgás felbontására épülő modell (Scale Resolving Modells SRM): Csak a nagy örvényeket bontjuk fel. A kisebb örvények hatását SubGrid scale Stress modellekkel vesszük figyelembe. A falhoz közeledve egyre finomabb háló kell.
<i>Mixture modell</i>	kevert modellezés, Feltételezett (lokálisan) homogén áramlást fázisarányokkal, mint mezőváltókkal ír le. Megoldjuk a keverék mozgásegyenletét, átlagolt anyagi jellemzőkkel, valamint a fázisok közötti – viszonylag kis – elcsúszási sebességek mozgásegyenleteit.
<i>Open pound PBR</i>	Nyílt felszínű, sekély, tóyszerű, esetenként ferde lejtőszögű algatermesztő berendezések összefoglaló neve. Legjellemzőbb elrendezése a Raceway.
<i>Photo Bio-Reactor (PBR)</i>	A fotobioreaktor fotoszintézisen alapuló biológiai termesztőrendszerek összefoglaló neve
<i>photosynthetically active radiation (PAR)</i>	Fotoszintetikusán aktív hullámhossztartomány (~400-700nm)
<i>Prandtl's Mixing Length (Prandtl MLH)</i>	A Prandtl keverési hossz volt a turbulencia modell első sikeres példája. Általánosságban jól illeszkedik a kétdimenziós határretegek áramlásához mind a derészögű, mind a hengeres geometriákban, ha nincsenek recirkulációs áramlások.

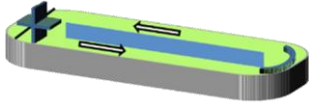
KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
	 <p data-bbox="409 378 991 637">A 2D csatorna- és csőáramlásokhoz csak egy jelentős tangenciális stressz-összetevő van, nevezetesen $\tau = \overline{u'v'}$ és a sebesség-gradiens $\partial\bar{u}/\partial y$. Prandtl azt állította, hogy a fluktuációs mozgás V_t sebesség mértaránya megegyezik a L_m hossz méretarányával, amelyet a keverési hosszknak nevezünk,</p> $V_t = L_m \left \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} \right $
<p data-bbox="261 737 381 900">Residence Time Distribution (RTD)</p>	<p data-bbox="409 737 991 1037">A tartózkodási idő eloszlás egy valószínűségi eloszlásfüggvény, amely leírja azt az időtartamot, amelyet egy folyadékkelem tölthet el egy reaktorban, amelyet a reaktorokban lévő keverési és áramlási feltételek jellemzésére használnak. A reaktorba belépő folyadékkelemnek 3 esete van: egyből kilép, határozott ideig, vagy végtelen ideig bent marad a PBR-ben.</p>
<p data-bbox="261 1073 381 1137">sztochiometria</p>	<p data-bbox="409 1073 991 1155">vegyészet azon ágazata, amely a vegyi folyamatok során tapasztalható súly- és térfogatváltozásokat és törvényszerűségeiket állapítja meg</p>
<p data-bbox="261 1183 381 1246">Tubular PBR</p>	<p data-bbox="409 1183 991 1392">Plexiből vagy üvegből készült zártrendszerű vízszintes, függőleges, ferde, vagy kombinált elrendezésű csőhálózat. (átmérő max 6cm) Algatermesztő berendezések összessége. Az alga keveredést, keringtetést, rendszerint Levegő CO₂ keverék befúvatásával oldják meg, de előfordul fogaskerekes, vagy roots szivattyús megoldás is. .</p>
<p data-bbox="261 1410 381 1483">Turbulent Viscosity</p>	<p data-bbox="409 1410 991 1528">Feltételezve, hogy a turbulencia skaláris jellemzővel (k-val és ε-al) leírható, meghatározhatjuk a turbulencia léptékét.</p> $T = \frac{k}{\varepsilon} [s] \leftarrow \varepsilon := \frac{dk}{dt}$

KIFEJEZÉS	MAGYARÁZAT
<p data-bbox="297 948 426 1106">Volume Of Fluid (VOF) modell</p>	$V' = \sqrt{k} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \leftarrow k := \frac{\overline{u'^2 \cdot v'^2 \cdot w'^2}}{2}$
	$L = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} [\text{m}] \leftarrow L := V' \cdot T$
<p data-bbox="448 365 1032 438">A képletek alapján meghatározhatjuk a turbulens viszkozitást.</p>	<p data-bbox="448 456 1032 484">Kolmonov Prandtl formula:</p>
$v_t = C_\mu \cdot L \cdot V' = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \leftarrow C_\mu := 0.09 \text{ (Mérések alapján)}$	<p data-bbox="448 647 1032 911">A dimenzió megfontolásokon túlmenően, a Kolmogorov-Prandtl formula, a Prandtl-féle keveredési úthossz modell általánosításának is tekinthető (mely szerint szintén $v_t \sim LV'$, azonban V' értékét a keveredési úthossz modell nem k-ból, hanem egyszerűen $L \cdot S$ szorzatként határozza meg).</p>
<p data-bbox="448 948 1032 1066">A folyadék térfogat modellezés az elkülönült áramlási formák elemzésére, a felszín pontos alakjának meghatározására alkalmas.</p>	

FÜGGELÉK

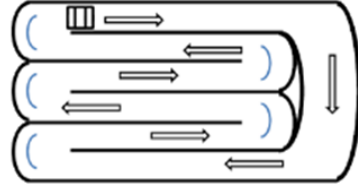
I.MELLÉKLET: PBR TÍPUSOK

a. NYITOTT PBR RENDSZEREK (OPEN POND)



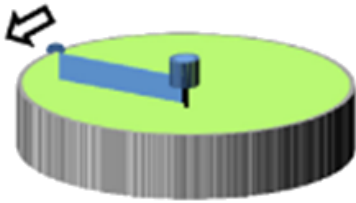
(a)

futópálya alak
[Raceway type]



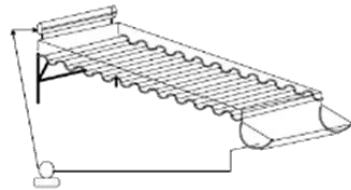
(b)

zegzugos futópálya
[multigrade Raceway]



(c)

köralak
[circular type]



(d)

hullám alapzatú vékony réteg
[thin layer with undulating base]

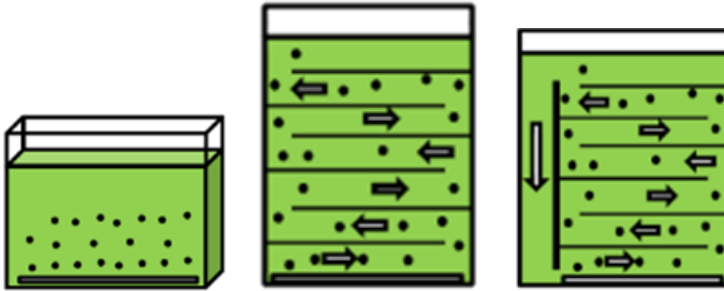


(e)

fedett tó
[covered pond]

Forrás: (S. S. Oncel 2015)

b. TÁBLÁS PBR-EK (PANEL TYPE)



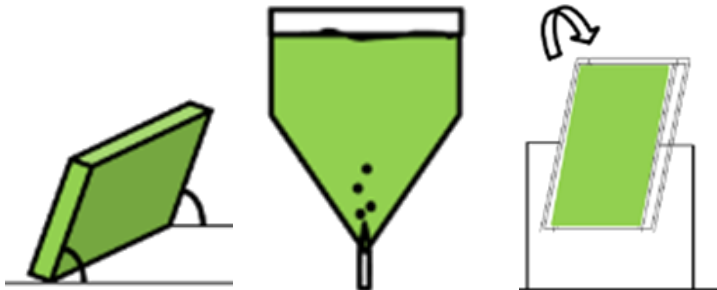
(a)

függőleges lapos tábla
[vertical flat panel]

(b)

függőleges többkamrás
lapos tábla
[vertical flat panel
with baffles]

(c)

függőleges többkamrás
lapos tábla,
levegőkeringtetéssel
[vertical flat panel
with baffles arlift
type]

(d)

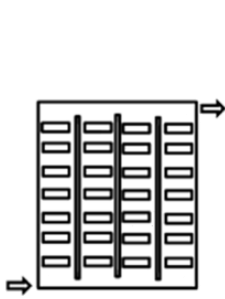
függőleges dönthető
lapos tábla
[inclined]

(e)

V-alakú függőleges
lapos tábla
[V-shaped]

(f)

függőleges lengő lapos
tábla
[rocking]



(g)

függőleges lapos tábla
integrált rekeszekkel
[integrated
compartment]



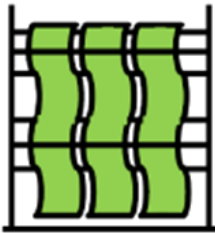
(h)

mágneses vagy
botkeverő
[Roux type]



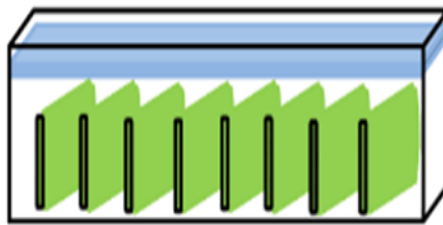
(i)

gyűrűs elrendezés
[torus type]



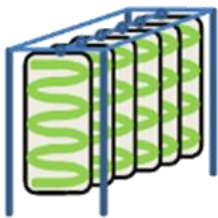
(j)

harmonika alakú
[accordion type]



(k)

elmerített zsák
[submerged bag type]



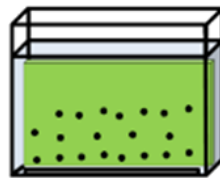
(l)

zegzugos sajtolt cső
[with pressed tubular
grid]



(m)

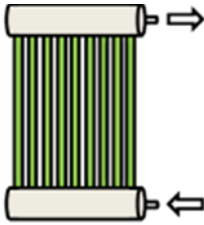
kupola alakú
[dome type]



(n)

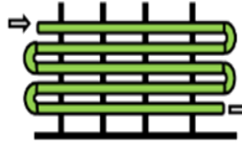
rögzített
[immobilized]

c. CSÖVES PBR-EK (TUBULAR PBR)



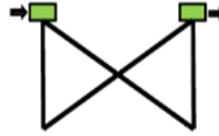
(a)

álló csőelosztóval
[Vertical with
manifolds]



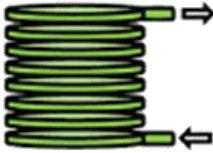
(b)

kerítés típus u alakban
hajlított
[fence type with u-
bends]



(c)

α -típus
[α -type]



(d)

spirális
[helical]



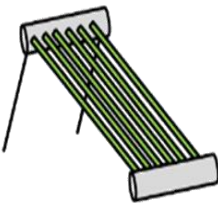
(e)

kúpos
[conical]



(f)

piramis
[pyramid]



(g)

lejtős csőelosztóval
[inclined with
manifolds]



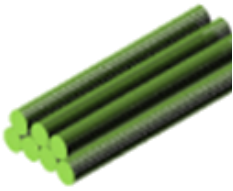
(h)

vízszintes
csőelosztóval
[horizontal with
manifolds]



(i)

robosztus hajlított
[strongly curved]



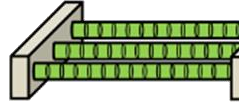
(j)

többszörös köteg
[multi stack]



(k)

függőleges hurok alakú
[vertical loop like]



(l)

statikus keverők
[with static mixers]

Forrás: (Oncel, 2015)

d. PBR FERMENTORTÍPUSOK (FERMENTERS)



(a)

keverőtartály
[Stirred tank]



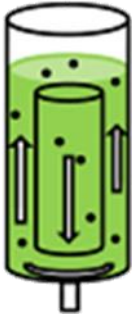
(b)

buborékoszlop
[bubble column]



(c)

belsőhurkos,
betétszövön keresztüli
légram
[internal loop draft
tube sparged airlift]



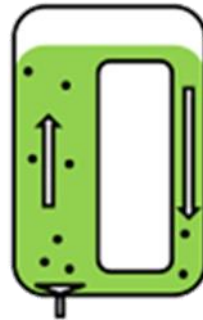
(d)

gyűrűs befúvatás
[annular sparged]



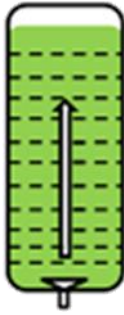
(e)

osztott oszlop (osztott
henger levegőemelés)
[divided column
(split cylinder airlift)]



(f)

külső hurok
[external loop]



(g)

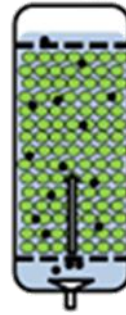
perforált lapos oszlop

[perforated plate
column]

(h)

statikus keverő

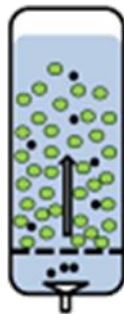
[statics mixer]



(i)

töltött ágy

[packed bed]



(j)

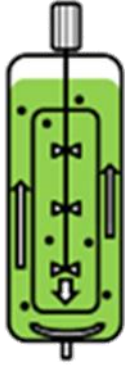
folyadékágyas
[fluidized bed]

(k)

terelő betécsöves
levegőemelés
[draft tube baffle
airlift]

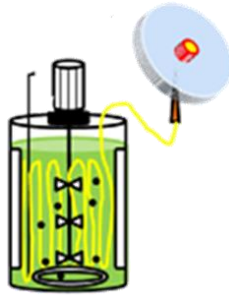
(l)

mechanikus keverő
betécsőhöz illesztett
befúvás
[mechanical mixer
adapted draft tube
sparged]



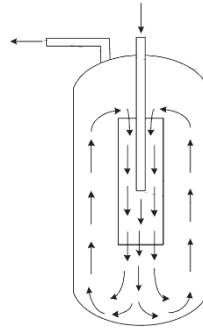
(m)

gyűrűs befúvátás
[annular sparged]



(n)

keverőtartályhoz
csatolt kollektor
(benne optikai kábeles
megvilágítással)
[collector adopted
stirred tank
(integrated
illumination by
optical fibers)]



(o)

sugár hurokreaktor
[jet-loop reactor]
(Szafran és Kmiec
2004)

Forrás: (Oncel, 2015)

II. FLUENT SOLVER PARAMÉTEREZÉSE

Az *ANSYS FLUENT* menüpontjaiban mindkét modellre (**Mixture** és **VOF**) tekintettel a következő beállításokat végeztem: [zárójelben a menüszint vagy e betűjelessel több helyről elérhető felugró ablak]

→1↓ *Meshing*: (inaktív nincs beállítható paraméter)

→2↓ *Solution setup*:

→2/1↓ *General*:

›*Solver Type*: Pressure-based (✓); *Velocity Formulation*: Absolute (✓); *Time*: Transient (✓);

Gravity (✓);

›*Gravity Acceleration*: X (m/s²) = 0; Y (m/s²) = -9.81; Z (m/s²) = 0;

→2/2↓ *Models*: az alkalmazott multifázis modellek főbb paramétereit itt kerülnek beállításra.

›*Models*:

<Mixture>

↓ Multiphase – Mixture

→2/2↓1↓ Edit...:

›*Model*: Mixture (✓);

›*Mixture Parameters*: Slip Velocity [✓];

Number of Eulerian Phase = 2;

↓ Viscous – Standard k-epsilon

→2/2↓2↓ Edit...:

›*Model*: k-epsilon (2 eqn.) (✓);

›*k-epsilon Model*: Realizable (✓);

›*Near-Wall Treatment*: Non-Equilibrium Wall Functions (✓);

› *Model Constants*: c2-Epsilon = 1.9; TKE Prandtl Number = 1; TDR Prandtl Number = 1.2; Dispersion Prandtl Number = 0.75;

›*User – Defined Functions*: Turbulent Viscosity = None ✓;

<VOF>

↳ Multiphase – Volume of Fluid

→2/2↳1↳ Edit...:

›*Model*: Volume of Fluid (✓)

›*Volume of Fluid Parameters: Scheme*: Explicit (✓); Volume Fraction Cutoff = 1e-06;

Current Number = 0,1;

›Number of Eulerian Phase = 2

↳ Viscous – Standard k-omega

→2/2↳2↳ Edit...:

›*Model*: k-omega (2 eqn.) (✓);

›*k-omega Model*: Standard (✓);

›*k-omega Options*: Shear Flow Corrections [✓];

›*Options*: Production Limiter [✓];

›*Model Constants*: Alpha*_inf = 1; Alpha_inf = 0.52; Beta*_inf = 0.09;

Beta_i = 0.072; SDR Prandtl Number = 2; Production Limiter Clip

Factor = 10;

›*User – Defined Functions*: Turbulent Viscosity = None ✓;

→2/3↳ Materials:

›*Materials*:

›*Fluid*:

↳ carbon – dioxide

→2/3↳1↳ Create/Edit...:

›*Name* = carbon -dioxide;

›*Chemical Formula* = co2;

›*Material Type* = fluid;

›*Fluent Fluid Materials* = carbon – dioxide (co2);

›*Order Materials by*: Name (✓);

›*Properties*: Density (kg/m3) = constant ✓, 1.7878; Viscosity (kg/m-s) = constant ✓,

1.37e-05;

↳ water - liquid

→2/3↳2↳ Create/Edit...:

›*Name* = water - liquid;

›*Chemical Formula* = h2o;

›*Material Type* = fluid;

›*Fluent Fluid Materials* = water - liquid (h2o);

›*Order Materials by*: Name (√);

›*Properties*: Density (kg/m³) = constant√, 1200; Viscosity (kg/m-s) = constant√, 0.001003;

›*Solid*:

└ aluminium

→2/3└3└ Create/Edit...:

›*Name* = aluminium;

›*Chemical Formula* = al;

›*Material Type* = solid;

›*Fluent Fluid Materials* = aluminium (al);

›*Order Materials by*: Name (√);

›*Properties*: Density (kg/m³) = constant√, 2719;

→2/4└ Phases:

›*Phases*:

└ viz_fázis – Primary Phase

→2/4└1└ Edit...:

›*Name* = viz_fázis;

›*Phase Material* = water - liquid;

→2/4└1└1└ Edit...:

›*Properties of water – liquid*: Density (kg/m³) = constant√, 1200; Viscosity (kg/m-s) = constant√, 0.001003;

›*ID* = 2;

└ co2_fázis – Secondary Phase

→2/4└2└ Edit...:

›*Name* = co2_fazis;

›*Phase Material* = carbon - dioxide;

→2/4↓2↓1↓ Edit...:

›Properties of carbon - dioxide: Density (kg/m³) = constant, 1.7878; Viscosity (kg/m-s) = constant, 1.37e-05;

›ID = 3;

→2/5↓ Cell Zone Conditions:

›Zone:

↓ part - solid

→2/5↓1↓ Edit...:

›Zone Name = part - solid;

›Phase = mixture;

›Rotation - Axis Origin: X (m) = constant, 0; Y (m) = constant, 0;
Z (m) = constant, 0;

›Rotation -Axis Direction: X (m) = constant, 0; Y (m) = constant, 0;
Z (m) = constant, 0;

→2/6↓ Boundary Conditions:

›Zone:

↓ inlet

›Phase: mixture;

›Type: velocity-inlet;

›ID = 24;

→2/6↓1↓ Edit...:

›Zone Name = inlet;

›Phase = mixture;

›Momentum Tab↓

›Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary;

›Reference Frame: Absolute;

›Velocity magnitude (m/s) = 60, Constant;

›Supersonic / Initial Gauge Pressure (pascal) = 0, Constant;

›Turbulence:

→2/6↓1/1↓ Specification Method: Intensity, and Viscosity Ratio[✓]

›Turbulent Intensity (%) = 5, →1/6↓1/1↓1↓ P;

›Turbulent Viscosity Ratio = 10, →1/6↓1/1↓1↓ P;

↓ interior-part-solid

›Phase: mixture[✓];

›Type: interior[✓];

›ID = 2;

→2/6↓2↓ Edit...:

›Zone Name = interior-part-solid;

›Phase = mixture;

↓ outlet

›Phase: mixture[✓];

›Type: pressure-outlet[✓];

›ID = 25;

→2/6↓3↓ Edit...:

›Zone Name = outlet;

›Phase = mixture;

›Momentum Tab↓

›Gauge Pressure (pascal) = 0, constant[✓];

›Backflow Direction Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary[✓];

›Turbulence:

→2/6↓1/1↓ Specification Method: Intensity, and Viscosity Ratio[✓]

›Turbulent Intensity (%) = 5, →1/6↓1/1↓1↓ P;

›Turbulent Viscosity Ratio = 10, →1/6↓1/1↓1↓ P;

↓ wall

›Phase: mixture[✓];

›Type: wall[✓];

›ID = 7;

→2/6↓4↓ Edit...:

›Zone Name = wall;
 ›Phase = mixture;
 ›Adjacent Cell Zone = part-solid;
 ›Momentum Tab↓
 ›Wall Motion: Stationary Wall (√);
 ›Shear Condition: No Slip (√);
 ›Wall Roughness:
 ›Roughness Height (m) = 0, constant√;
 ›Roughness Constant = 0.5, constant√;

↓ wall-part-solid
 ›Phase: mixture√;
 ›Type: wall√;
 ›ID = 1;

→2/6↓2↓ Edit...:
 ›Zone Name = interior-part-solid;
 ›Phase = mixture;

→2/7↓ Reference Values:
 <Mixture>
 →2/7/1↓ Compute from. √;
 ›Reference Values: Area (m2) = 1; Density (kg/m3) = 1.225; Enthalpy (j/kg) = 0;
 Length (m) = 1; Pressure (pascal) = 0; Temperature (k) = 288.16;
 Velocity (m/s) = 1; Viscosity (kg/m-s) = 1.7894e-05;
 Ratio of Specific Heats (kg/m-s) = 1.4;
 ›Reference Zone. √;

 <VOF>
 →2/7/1↓ Compute from. part-solid√;
 ›Reference Values: Area (m2) = 1; Density (kg/m3) = 1.7878; Enthalpy (j/kg) = 0;
 Length (m) = 1; Pressure (pascal) = 0; Temperature (k) = 288.16;
 Velocity (m/s) = 1; Viscosity (kg/m-s) = 1.37e-05;
 Ratio of Specific Heats (kg/m-s) = 1.4;
 ›Reference Zone: part-solid√;

→3.1 Solution

→3/1.1 Solution Methods:

<Mixture>

›Pressure-Velocity Coupling: Scheme = Simple;

›Spatial Discretization: Gradient = Least Squares Cell Based; Pressure = PRESTO!;

Momentum = Second Order Upwind; Volume Fraction = First Order Upwind;

Turbulent Kinetic Energy = Second Order Upwind; Turbulent Dissipation

Rate = Second Order Upwind;

›Transient Formulation = First Order Implicit;

→3/1.1.1 Options...:

›Variables = Flow Variables Only (√);

›Relaxation Factor = 0.75;

<VOF>

›Pressure-Velocity Coupling: Scheme = PISO; Skewness Correction = 1; Neighbour
Correction = 1;

›Spatial Discretization: Gradient = Least Squares Cell Based; Pressure = PRESTO!;

Momentum = Second Order Upwind; Volume Fraction = Compressive;

Turbulent Kinetic Energy = Second Order Upwind; Turbulent Dissipation

Rate = Second Order Upwind;

›Transient Formulation = First Order Implicit;

→3/1.1.1.1 Options...:

›Variables = Flow Variables Only (√);

›Relaxation Factor = 0.75;

→3/2.1 Solution Controls:

›Under Relaxation Factors: Pressure = 0.3; Density = 1; Body Forces = 1;

Momentum = 0.7; Slip Velocity = 0.1; Volume Fraction = 0.5; Turbulent Kinetic

Energy = 0.8; Turbulent Dissipation Rate = 0.8; Turbulent Viscosity = 1;

→3/2.1.1 Equalations...:

›Equalations: Flow; Volume Fraction; Slip Velocity; Turbulance;

→3/2.1.2 Limits...:

›*Solution Limits*: Minimum Absolute Pressure (Pascal) = 1; Maximum Absolute Pressure (Pascal) = 5e+10; Minimum Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) = 1e-14; Minimum Specified Turbulent Dissipation Rate (1/s) = 1e-20; Maximum Turbulent Viscosity Ratio = 10000;

<Mixture>

→3/2↓3.↓ Advanced...

›*Multigrid Tab*;

Pressure: Cycle Type = V-Cycle; Termination = 0.1; AMG Method = Aggregative;

X-Momentum: Cycle Type = Flexible; Termination = 0.1; Restriction = 0.7; AMG Method = Aggregative;

Y-Momentum: Cycle Type = Flexible; Termination = 0.1; Restriction = 0.7; AMG Method = Aggregative;

Z-Momentum: Cycle Type = Flexible; Termination = 0.1; Restriction = 0.7; AMG Method = Aggregative;

Turbulent Kinetic Energy: Cycle Type = Flexible; Termination = 0.1; Restriction = 0.7; AMG_Method = Aggregative;

Specified Dissipation Rate: Cycle Type = Flexible; Termination = 0.1; Restriction = 0.7; AMG Method = Aggregative;

›*Algebraic Multigrid Controls*:

›*Scalar Parameters*:

›*Fixed Cycle Parameters*: Pre-Sweeps = 0; Post-Sweeps = 1; Max Cycles = 30;

›*Coarsening Parameters*: Max Coarsening Levels = 0; Coarsen by = 2;

›*Smoother Type* = Gauss-Sedel (√);

›*Flexible Cycle Parameters*: Sweeps = 2; Max Fine Relaxations = 30; Max Coarse Relaxations = 50;

›*Options*: Verbosity: 0;

→3/3.↓ Monitors:

›*Residuals, Statistic and Force Monitors*:

→3/3↓1.↓ *Residuals – Print, Plot*:

→3/3↓1.↓ *Edit...*

›*Options*: Print to Console [√]; Plot [√]; Window = 1;

→3/3↓1↓1.↓ *Curves...*

→3/3↓1↓2↓ Axes...

Iterations to Plot = 1000;

Iterations to Store = 1000;

Equations:

Residual: Continuity; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual: x-velocity; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual: y-velocity; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual: z-velocity; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual: k ([k]); Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

<Mixture>

Residual: epsilon; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual: vf-co2_fázis; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

<VOF>

Residual: omega; Monitor Check [√]; Convergence [√]; Absolute
Criteria = 0.0001;

Residual values: Scale [√];

Convergence Criterion: Absolute;

→3/4↓ Solution Initialization:

Initialization Method: Standard Initialization (√);

Compute From: [Bármely zónára vagy anyagra] ;

Initial Values: Gauge Pressure = 0; x-velocity = 0; y-velocity = 0; z-velocity = 0;
Turbulent Kinetic Energy (m²/s²) = 1; Specific Dissipation Rate (1/s) = 1;
co2_fázis Volume Fraction = 0;

→3/5↓ Solution Activities:

Autosave Every Time steps: 0; →3/5↓1↓ Edit...

»Automatic Export...; →3/5↓2↓ Create...;

»Execute Commands: ...; →3/5↓3↓ Create/Edit...;

»Automatically: []; →3/5↓4↓ Edit...;

»ExSolution Animationns: ...; →3/5↓5↓ Create/Edit...;

→3/6↓ Run Calculation:

<Mixture>

»Time Stepping Method: Fixed*;

»Time Stepp Size (s) = 1; [→3/5↓1↓ P;]

»Number of Time Stepps = 1;

»Max Iterations / Time Stepps = 20;

»Reporting Interval = 1;

»Profil Update Interval = 1;

→3/6↓1↓ Calculate;

<VOF>

»Time Stepping Method: Fixed*;

»Time Stepp Size (s) = 0.0001; [→2/5↓1↓ P;]

»Number of Time Stepps = 4000;

»Max Iterations / Time Stepps = 25;

»Reporting Interval = 25;

»Profil Update Interval = 1;

→3/6↓1↓ Calculate;

→4↓ Results

→4/1↓ Graphics and Animations:

»Graphics: [→4/1↓1↓ Mesh]; [→4/1↓2↓ Vectors]; ...

→4/2↓ Plots:

»Plots: [→4/2↓1↓ XY Plot]; ...;

→4/3↓ Reports:

»Reports: [→4/3↓1↓ Forces]; [→4/3↓2↓ Volume]; ...

III. AZ EZREDFORDULÓ ÓTA CFD ALKALMAZÁSÁVAL VIZSGÁLT PBR-EK LISTÁJA.

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
Cylindrical bubble column	FLUENT	Investigation of PBR for microalgae for biodiesel production	k-ε	(I. H. Seo és mtsai. 2010)
Flat plate	FLUENT	Study on the destabilization mixing in the flat plate PBR	k-ε	(Su és mtsai. 2010)
Pipe type	FLUENT	Development of virtual PBR for microalgae culture considering turbulent flow and flashing light effect	-	(Sato, Yamada, és Hirabayashi 2010)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Assessment of turbulence models	k-ε	(Gimbun 2009)
Torus reactor	FLUENT	Hydrodynamics in a square-sectioned torus reactor, mixing time	k-ω	(Pramparo és mtsai. 2008)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Comparison of species modelling	-	(Yoo és mtsai. 2009a)
Rectangular bubble column	FLUENT	Drag force formulation to describe regime transitions	k-ε	(Simonnet és mtsai. 2008)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Continuous phase viscosity, bubble diameter and drag model	-	(dos Santos és mtsai. 2007)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Use of VOF: effect of air distributor	k-ε	(Akhtar, Pareek, és Tadé 2007)

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
Rectangular bubble column	FLUENT	Radiation distribution in an externally illuminated PBR	RNG k-ε	(Trujillo, Safinski, és Adesina 2007)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Applicability of VOF modell, hydrodynamics of flow	Standard k-ε	(Akhtar, Pareek, és Tadé 2007)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Mixing as affected by gas velocity, effect of turbulence modells	k-ε	(Rampure, Kulkarni, és Ranade 2007)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Design of a gas distributor: 3D CFD simulation of a coupled system consisting of a gas chamber and a bubble column	k-ε	(Dhotre és Joshi 2007)
Torus shape reactor	FLUENT	Hydrodynamics of flow, mixing with impeller	k-ω	(Pruvost, Pottier, és Legrand 2006)
Cylindrical bubble column		Prediction of flow pattern using 1D, 2D and 3D k-ε modells Axial dispersion coefficient	Standard k-ε	(Ekambara, Dhotre, és Joshi 2005)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Gas-liquid-solid flow modelling	k-ε	(Cartland-Glover és Generalis 2004)
Draft tube airlift reactor	FLUENT	Pressure drop to measure gas hold-up, vertical velocity	-	(Blažej és mtsai. 2004)
Rectangular flat walled column	FLUENT	Hydrodynamics of flow, mixing characteristics	-	(A. Kommareddy és Anderson 2004)

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
Cylindrical bubble column	FLUENT	Bubble size distribution, axial liquid velocity, gas hold-up	–	(Mouza, Kazakis, és Paras 2004)
Jet-loop reactor	FLUENT	Hydrodynamics of flow, three phase system (gas–liquid–solid)	Standard k–ε	(Szafran és Kmiec 2004)
Airlift reactor	CFX 4.2	Hydrodynamics of flow Standard	k–ε	(van Baten, Ellenberger, és Krishna 2003)
Fluidized bed	Modified K-FIX	Hydrodynamics of flow with binary mixtures	–	(Huilin, Yurong, és Gidaspow 2003)
Plate type	FLUENT	Hydrodynamics of flow and improvement of the PBR	RNG k–ε	(Perner, Posten, és Broneske 2003)
Rectangular and Cylindrical bubble columns	FLUENT	Comparison among modelling approaches, 2D v/s 3D, order of discretization, turbulence closure	Standard k–ε, Prandtl	(Bertola, Vanni, és Baldi 2002)
Cylindrical bubble column	CFX 4.2, 4.4	Scaling up with highly viscous liquid phase	Standard k–ε	(Krishna és Baten. 2002)
Cylindrical bubble column	CFX 4.3	Influence of superficial gas velocity, solid loading and geometry on liquid flow velocities and hold-up distributions	Standard k–ε	(Michele és Hempel 2002)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Simulate transient fluid dynamics and mixing in a shallow PBR	Standard k–ε	(Ranade és Tayalia 2001)
Cylindrical bubble column	CVD-2	Hydrodynamics of bubble rising in a liquid medium at high pressures	–	(Yong Li, Zhang, és Fan 2000)

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
Cylindrical bubble column	CFX 4.2, 4.4	Three-phase Eulerian simulation in churn turbulent regime	Standard k-ε	(Krishna, van Baten, és Urseanu 2000)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Simulation of a two-phase flow	ASMM	(Glover, Generalis, és Thomas 2000)
Rectangular bubble column	STABILIZED	Effect of aspect ratio of bubble column on flow pattern	–	(Delnoij E., Kuipers, és van Swaaij 1999)
Rectangular bubble column	CFX 4.2	The influence of turbulence modelling (turbulent and laminar)	Standard k-ε	(Pfleger és mtsai. 1999)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Validation of a transient, 2D axisymmetric simulations	ASMM	(Sanyal és mtsai. 1999)
Cylindrical bubble column	FLUENT	Drag force, Radial lift force on the basis of drift flux constants	–	(Thakre és Joshi 1999)
flat panel PBR	ANSYS (nicknamed QMOM)	Investigation of turbulent multiphase flows	k-ε turbulence modell,	(del Ninno 2012)
Various plate and cylindrical PBR	(ver. 2.4.6, ANSYS,	Evaluation of a photobioreactor performance	standard k-ε	(I.-H. Seo és mtsai. 2014)
thin layer cascading PBR	Fluent	Massive culturing of microalgae for food, feed, and energy	k-ε	(Larrucea Osorio 2010))
inner baffles in a flat plate PBR	ANSYS or COMSOL	Optimisation Of Micro-algal Biodiesel Production	k-ε turbulence modell	(Krys Bangert 2013)
Bubble Column	OpenFoam, Fluent 6.3.26	Comparison of commercial and Open Source Solvers with an Experiment	- CFD simulation of bubble columns	(Horváth és mtsai. 2009)

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
			using a vof modell	
bubble columns	OpenFOAM	Using a VOF modell	-	(Horváth és mtsai. 2009)
Airlift flat-panel PBR	CFX5	optimize the inner structure parameters	-Fluid-dependent turbulence modell -Dispersed phase zero equation -k-Epsilon	(Yu és mtsai. 2009)46:
industrial raceway reactor	Matlab 8.3	A dynamic modell for microalgae production	-	(Fernández és mtsai. 2016)
flat plate airlift PBR or with two panels	COMSOL Multiphysics	ideal light–dark cycle designed		(M. Li, Hu, és Liu 2014)
the Taylor–Couette (T3C) reactor.	Ansys Fluent 14.5	predicts phase velocity, velocity fluctuation, and gas distribution,	standard k– ϵ and k– ω	(Gao, Kong, és Dennis Vigil 2016)
raceways pond.	COMSOL Multiphysics	Hydrodynamic evaluations	k– ϵ	(Hadiyanto és mtsai. 2013)
flat panel airlift PBR	Gambit 2.3.16. majd Fluent 6.3.26.	establish and validate a CFD hydro-dynamic modell	k– ϵ discrete phase modell	(Massart és mtsai. 2014)
gas-liquid bubble columns		'hierarchy of modells' --Eulerian-Eulerian two fluid modell, --Eulerian-Lagrangian discrete bubble modell		(Delnoij, Kuipers, és van Swaaij 1997)

PBR típus	CFD kód	A tanulmány lényege	Turbulencia modell	Szerző
		--Volume Tracking --Marker Particle modell.		
gas-liquid bubble columns		presented a discrete bubble modell		(Delnoij és mtsai. 1997)
2D rectangular column	CFX 4.1c	VOF technique can be used for a priori simulations of bubble trajectories		(Krishna és van Baten 1999)

IV. MINTAVÉTELI IDŐPONTOK

a. A HUROKREAKTOR ELSŐ VÁLTOZATÁVAL (2017)

Dátum	Fő- minta	alga konc. g/l	Üle- pített	alga konc. g/l	Egyéb	alga konc. g/l
17.07.05	F(ts)	0,2281				
17.07.06	F(ts)					
17.07.07	F(ts)					
17.07.10	F(ts)	0,2614	CS	0,6340		
17.07.13	F(ts 1l)		CS	0,6346		
17.07.14	F(ts 1l)		CS	0,9504		
17.07.18	F(ts 1l)	0,7453	CS	1,2702	F(CF0)	1,0058
17.07.19	F(ts 3l)	0,6350	CS	1,6246		
17.07.21	F(ts 3l)	0,7882	CS	1,5450		
17.07.24	F(ts 3l)	1,1491	CS	1,5935		
17.07.26	F(ts 3l)	0,6109	CS	1,9287	F(CF0)	0,9411
17.07.28	F(ts 3l)	0,4225	CS	1,0137		
17.07.31	F(ts 3l)	0,6468	CS	1,9493		
17.08.02	F(ts 3l)	0,5678	CS	1,5986		
17.08.04	F(ts 3l)	0,3954	CS	1,0610		
17.08.07	F(ts 3l)	0,5495	CS	2,3437		
17.08.09	F(ts 3l)	0,4895	CS	1,8238		
17.08.11	F(ts 3l)	0,4917	CS	1,7870		
17.08.14	F(ts 3l)	0,5153	CS	2,2255		
17.08.16	F(ts 3l)	0,4947	CS	1,4537		
17.08.18	F(ts 3l)	0,4378	CS	1,7636		
17.08.21	F(ts 3l)	0,6958	CS	2,4319		
17.08.23	F(ts 3l)	0,6542	CS	2,0785		
17.08.25	F(ts 3l)		CS	1,9317		
17.08.28	F(ts 3l)	0,6891	CS	1,8772		
17.08.30	F(ts 3l)	0,6577	CS	1,8509		
17.09.01	F(ts 3l)	0,6750	CS	2,0728		
17.09.04	F(ts 3l)		CS	2,2347		
17.09.06	F(ts 3l)	0,6063	CS	1,9178		
17.09.08	F(ts 3l)	0,5653	CS	1,5783		
17.09.11	F(ts 3l)	0,6770	CS	2,6416		
17.09.13	F(ts 3l)	0,6292	CS	3,4762		
17.09.15	F(ts 3l)	0,5971	CS	2,7166		
17.09.18	F(ts 3l)	0,6644	CS	5,6193		
17.09.20	F(ts 3l)	0,5627	CS	3,6402		
17.09.22	F(ts 3l)	0,4917	CS	4,6135		
17.09.25	F(ts 3l)	0,5546	CS	4,6570		
17.09.27	F(ts 3l)	0,5101	CS	6,0923		
17.09.29	F(ts 3l)	0,3583	CS	1,9416		
17.10.02	F(ts 3l)	0,5160	CS	9,1900		
17.10.04	F(ts 3l)	0,5106	CS	6,4742		
17.10.06	F(ts 3l)	0,5149	CS	4,6767		

b. A HUROKREAKTOR MÓDOSÍTOTT VÁLTOZATÁVAL (2018)

Dátum	Fő- minta	alga konc. g/l	Ülle- pített	alga konc. g/l	Egyéb	alga konc. g/l
18.01.16	F(ts)					
18.01.19	F(ts)					
18.01.22	F(ts)					
18.01.23	F(ts)					
18.01.24	F(ts)					
18.01.26	F(ts)		CS	6,4219	F(CF1 10l)	0,1940
18.01.29	F(ts)					
18.01.30	F(ts)					
18.01.31	F(ts)					
18.02.01	F(ts)					
18.02.02	F(ts)					
18.02.05	F(ts)					
18.02.06	F(ts)		CS	9,6188		
18.02.07	F(ts)		CS	8,8079		
18.02.08	F(ts)					
18.02.09	F(ts)					
18.02.12	F(ts)					
18.02.13	F(ts)					
18.02.14	F(ts)					
18.02.15	F(ts)					
18.02.16	F(ts)					
18.02.19	F(ts)	0,9067	CS	29,9748		
18.02.20	F(ts)	1,9010	CS	3,7789		
18.02.21	F(ts)	2,0619	CS	10,3158		
18.02.22	F(ts)	2,9331	CS	5,8517		
18.02.23	F(ts)	1,2766	CS	9,0480	F(CF1 10l)	1,7886

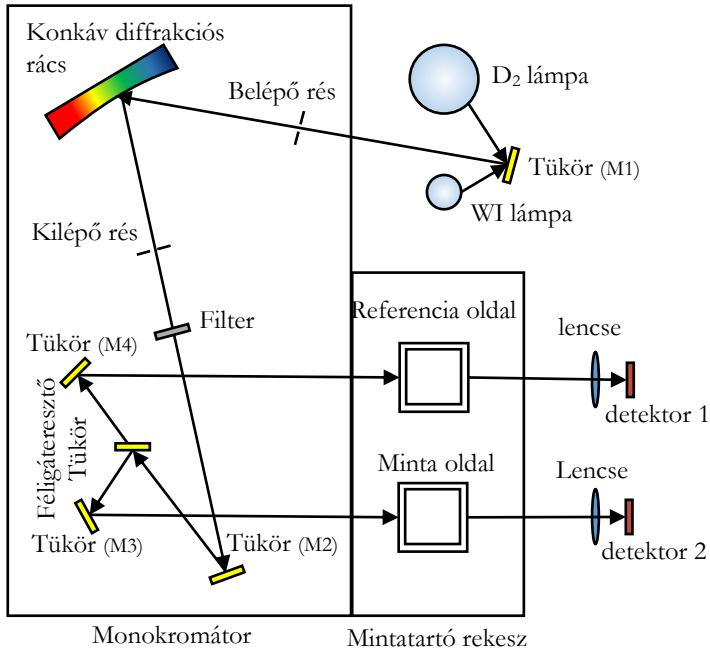
V.A BRISTOL TÁPOLDAT ÖSSZETÉTELE

Bristol tápoldat		
makroelem		adagolás: 10ml-t/11 tápoldathoz
Név	vegyjel	g/l
Nátrium-nitrát	NaNO ₃	25,00
Kalcium-klorid	CaCl ₂ ·2H ₂ O	2,50
Magnézium-szulfát	MgSO ₄ ·7H ₂ O	7,50
Kálium-hidrogén-foszfát	K ₂ HPO ₄	7,50
Kálium-dihidrogén-foszfát	KH ₂ PO ₄	5,90
Nátrium-klorid	NaCl	2,50
Kálium-klorid	KCl	3,20
mikroelem		adagolás: 1ml-t/11 tápoldathoz
Név	vegyjel	g/l
Etilén-diamin-tetraecetsav (EDTA)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈	50,00
Kálium-hidroxid	KOH	31,00
Vas(II)-szulfát	FeSO ₄ ·7H ₂ O	4,98
Kénsav	H ₂ SO ₄	(pH beállítás)
Bórsav	H ₃ BO ₃	11,41
Cink-szulfát	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	8,82
Mangán(II)-klorid	MnCl ₂ ·4H ₂ O	1,44
Ammonium-molibdát	NH ₄ Mo ₇ O ₂₄	0,81
Réz(II)-szulfát	CuSO ₄ ·5H ₂ O	1,57
Kobalt(II) nitrát	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0,49

orrás: (Bold 1949)

VI.MELLÉKLET HITACHI U-29 UV-VIS SPEKTROFOTOMÉTER

(fix optika 2 sugárnyalábbal)



Az osztott sugárnyalábos kialakításánál a fényforrás energiája egy féliáteresztő tükörrel van felosztva, úgyhogy az egyik a referencia oldaton halad át, a másik pedig a minta oldaton keresztül. A referencia oldal rendszerint ugyanaz az oldószer, amelyben a vizsgálandó minta van feloldva, illetve szuszpendálva. Így a két detektorra jutó fény intenzitásának eltérése csak a vizsgálandó mintával van összefüggésben. Mivel a két fénynyaláb ugyanabból a fényforrásból származik, így a fényforrás intenzitás esetleges változásai nem befolyásolják a mérést, ezáltal a hosszú ideig stabil mérést lehet megvalósítani.

A kijelzett eredmény transzmittancia értéke %-ban megadva ($T\%$), vagy abszorbancia érték (A).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad A = -\lg(T) = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Ahol I az mintaoldaton, I_0 a referencia oldaton áthaladt fény intenzitása. Az abszorbancia érték a Lambert-Beer törvény értelmében arányos a koncentrációval.

Optikai rendszer

Seya-Namioka dupla sugárnyaláb

Hullámhossz tartomány	190-1100nm
Natív spektrális sávszélesség	1,5nm
Diffúz megvilágítás	0,05% (220nm NaI, 340 nm NaNO ₂)
Hullámhossz pontosság	±0,3 nm (656,1nm, 486,0nm)
Hullámhossz beállítás	±0,1 nm
ismétlési pontossága	
Fotometriai tartomány	Abs: -3,000- 3,000 %T: 0- 300%T Conc: 0,000- 9999
Fotometriai pontosság	±0,002 Abs (0-0,5Abs) ±0,004 Abs (0,5-1,0Abs) ±0,008 Abs (1,0-2,0Abs) ±0,1 %T
Fotometriai ismétlési pontosság	±0,002 Abs (0-0,5Abs) ±0,004 Abs (0,5-1,0Abs) ±0,008 Abs (1,0-2,0Abs) ±0,1 %T
Hullámhossz letapogatás sebessége	10, 100, 200, 800, 1200 2400, 3600nm/min (Ezek a sebességek nem alkalmazható a szűrő vagy a fényforrás cseréje esetén)
Alapvonal stabilitás	0,00003 Abs/hr (500nm en 2 órával a bekapcsolás után)
Alapvonal egyenletesség	0,0006 Abs (200-950nm)
Zajszint	0,00015 Abs (500nm)
Reakcióidő	Gyors, közepes, lassú