

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



BAKALÁRSKA PRÁCA

KONŠTRUOVANIE UZATVORENÝCH FOTOBIOREAKTOROV
DESIGN OF FLAT PANEL PHOTOBIOREACTORS

AUTOR: Daniel Jakub Hrtus
ŠTUDIJNÝ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství
VEDÚCI: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

PRAHA 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

| | | | |
|---------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|
| Příjmení: | Hrtus | Jméno: Daniel Jakub | Osobní číslo: 437079 |
| Fakulta/ústav: | Fakulta strojní | | |
| Zadávající katedra/ústav: | Ústav procesní a zpracovatelské techniky | | |
| Studijní program: | Teoretický základ strojního inženýrství | | |
| Studijní obor: | bez oboru | | |

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:
Konstruování uzavřených fotobioreaktorů

Název bakalářské práce anglicky:
Design of flat panel photobioreactors

Pokyny pro vypracování:
1) Zpracujte rešerši zaměřenou na konstrukci uzavřených fotobioreaktorů a jejich klíčových konstrukčních uzlů. Detailněji se zaměřte na konstrukční uspořádání deskových fotobioreaktorů.
2) Experimentálně a analyticky stanovte tlakovou ztrátu laboratorního deskového fotobioreaktoru.

Seznam doporučené literatury:
Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:
doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

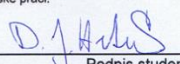
Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

| | | |
|---|--|--|
|  _____ doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce |  _____ prof. Ing. Tomáš Jirubut, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry |  _____ prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky) |
|---|--|--|

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26-04-2018 
Datum převzetí zadání Podpis studenta

Týmto prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne, pod dozorom vedúceho, a všetky použité zdroje a literatúru som riadne uviedol.

V Prahe dňa

.....

Daniel Jakub Hrtus

V prvom rade ďakujem vedúcemu práce doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D., za jeho spoľahlivé vedenie, hodnotné rady a pozitívny prístup. Taktiež ďakujem svojej najbližšej rodine za pomoc pri korekcii a za podporu.

Anotácia

Bakalárska práca je zameraná na proces produkcie biomasy z mikrorias, konkrétne na aparát pri tomto procese používaný – fotobioreaktor. Cieľom práce je vypracovať prehľad konštrukčných variantov fotobioreaktorov, špecificky doskových. V úvode teoretickej časti je opísaná funkcia CO₂ v atmosfére, jeho kľúčový pozitívny, ale aj negatívny vplyv. Redukcia negatívnych účinkov slúži ako motivácia pre kultiváciu rias. V nasledujúcej kapitole sú opísané dôležité faktory, ktoré treba brať do úvahy pri návrhu fotobioreaktora. Ďalej je prezentovaná rešerš konštrukčných variantov – patentov, konceptov z vedeckých publikácií, ako aj prakticky realizovaných a otestovaných modelov. Pri opisovaní jednotlivých konštrukcií je kladený dôraz na opis kľúčových sekcií fotobioreaktora. V experimentálnej časti je opísaný proces zostavovania doskového fotobioreaktora v školskom laboratóriu a následne je opísané a vyhodnotené meranie tlakových strát na zostavenom systéme. Dáta sú spracované aj analyticky a výsledky výpočtu sú porovnané s nameranými hodnotami.

Kľúčové slová: fotobioreaktor, doskový fotobioreaktor, mikroriasa, biomasa, oxid uhličitý, biopalivo, fotosyntéza, kultivácia

Annotation

The Bachelor's thesis targets the production process of algae biomass, more specifically an apparatus used in this process, called a photobioreactor. The goal of this thesis is to present an overview of construction variants of photobioreactors, precisely flat panel photobioreactors. The effect, positive and negative, of carbon dioxide in the atmosphere is described in the introductory part. The reduction of its negative influence serves as a motivation for algae cultivation. In the next chapter, important factors to consider when designing a photobioreactor are described. Afterwards, a construction variants research is presented – patents, concepts described in scientific papers, as well as some functioning examples from the industry. Key elements of a photobioreactor are highlighted to describe each concept. The experimental part describes an assembly process of a flat panel photobioreactor in the university laboratory and offers data evaluation from pressure drop measurement previously taken. The data are also analytically evaluated, and the results are contrasted with the measured pressure drop.

Key words: photobioreactor, flat panel photobioreactor, microalgae, biomass, carbon dioxide, biofuel, photosynthesis, cultivation

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod - argument pre kultiváciu rias | 8 |
| 1.1 | Redukcia a využitie emisií CO ₂ | 8 |
| 1.2 | Priemysel s mikroriasami | 10 |
| 1.3 | Mechanizmy rastu rias | 11 |
| 2 | Fotobioreaktory | 15 |
| 2.1 | Obecné faktory pri návrhu fotobioreaktorov | 17 |
| 2.2 | Doskové fotobioreaktory | 20 |
| 2.2.1 | Patentová a koncepčná rešerš | 24 |
| 2.2.2 | Rešerš aplikovaných doskových fotobioreaktorov | 38 |
| 3 | Experimentálna a výpočtová časť | 47 |
| 3.1 | Zostavenie fotobioreaktora | 47 |
| 3.2 | Analytický výpočet tlakových strát | 50 |
| 3.3 | Meranie tlakových strát | 57 |
| 3.4 | Vyhodnotenie dát | 57 |
| 4 | Záver | 59 |
| 5 | Zoznam použitých symbolov | 61 |
| 6 | Zoznam literatúry | 63 |

1 Úvod - argument pre kultiváciu rias

V 19. storočí sa fyzik a matematik Joseph Fourier zaoberal hypotézou, že veľká časť termálneho žiarenia zo zemského povrchu je absorbovaná atmosférou, a taktiež že časť absorbovanej energie je vyžarovaná späť k povrchu. O niekoľko rokov sa fyzikovi Johnovi Tyndallovi podarilo túto hypotézu overiť experimentálne. Vznikla tak idea skleníkového efektu. Tyndall potvrdil, že stopové atmosférické plyny ako vodná para, ozón a oxid uhličitý sú absorbenty a žiariče tepelnej energie. Ďalej bolo dokázané, že skleníkový efekt pomáha udržiavať teplotu na povrchu Zeme o 33 °C vyššiu ako by to bolo bez jeho pôsobenia. V modelovom experimente, ktorý nebral do úvahy pôsobenie nekondenzujúcich skleníkových plynov, bolo demonštrované, že vodná para, ktorá pomáha zvýrazňovať otepľovanie, bez prítomnosti CO₂ rýchlo skondenzuje a v podobe dažďa vyprší. Experiment potvrdil úlohu CO₂ ako termostatu, ktorý reguluje teplotu na Zemi.

Vedci odhadujú že pred päťdesiatimi miliónmi rokov bola koncentrácia CO₂ v atmosfére okolo 2000 ppm a na Zemi neboli trvalé ľadové plochy. Po uplynutí ďalších pätnásť miliónov rokov klesla táto hodnota na 450 ppm, umožňujúc začatie zaľadnenia. Analýzy vzoriek ľadu reprezentujúce vývoj za posledných 400 000 rokov ukazujú kolísanie od 180 ppm v dobe najväčšieho pokrytia povrchu ľadom, až po 280 ppm počas teplejších období. V súčasnej dobe hodnota koncentrácie CO₂ v atmosfére presahuje 400 ppm a stúpa o približne 2 ppm ročne. S nástupom éry precíznych meraní a dokumentácie boli experti schopní determinovať koncentráciu oxidu uhličitého v ére pred priemyselnou revolúciou na 280 ppm. Spoločne s meraniami priemernej globálnej teploty tieto dáta demonštrujú koreláciu medzi zvyšovaním koncentrácie CO₂ v atmosfére a nárastom teploty. Posudky vytvorené Medzinárodným panelom o zmene klímy (IPCC) a tisícky vedeckých správ potvrdzujú, že je kľúčové kriticky sa zaoberať ľudským vplyvom na skleníkové plyny. [1]

1.1 Redukcia a využitie emisií CO₂

Jedno zo zásadných politických rozhodnutí o znížení emisií CO₂ bolo prijaté na Klimatickej konferencii v Paríži. Jej výsledkom bola tzv. Parížska dohoda, ktorá má za cieľ udržať zvyšovanie globálnej priemernej teploty na hodnotu do 2 °C v porovnaní s predindustriálnou érou a usilovať sa o limitovanie tohto nárastu na hodnotu do 1,5 °C. Existujú viaceré prístupy k riešeniu zníženia emisií CO₂. Jedna skupina zastáva ich redukciu

prostredníctvom zvýšenia efektivity spaľovacieho procesu použitím fosílnych palív s menšími špecifickými emisiami CO₂ alebo obnoviteľných uhlíkovo neutrálnych zdrojov. Tá druhá reprezentuje aktívne znižovanie množstva vyprodukovaného CO₂ jeho odstránením pred a po energetickej konverzii palív na uhlíkovej báze.

Druhú spomenutú skupinu reprezentuje technológia Carbon Capture and Storage (CCS). Je to technológia skladajúca sa zo zachytávania CO₂ zo spalín fosílnych uhlíkových palív, najmä v zariadeniach na výrobu energie a v tepelných priemyselných procesoch. Ďalšími krokmi sú transport a dlhodobé bezpečné uskladnenie. Technológia CCS má však výrazný nedostatok a to zvýšené energetické nároky. V prípade elektrárne spaľujúcej fosílnu palivú môžu tieto nároky byť vo výške 15 % energetickej produkcie elektrárne. Je preto pravdepodobné, že sa proces nepresadí komerčne a jeho fungovanie bude závislé na dotáciách. [2]

Medzi potenciálne náhrady fosílnych palív patria biopalivá, medzi ktoré patria aj etanol či biodiesel, vyrábané z kukurice, cukrovej trstiny či sójových bôbov. Faktom však je, že celosvetovo tvorí ich podiel medzi transportnými palivami menej ako 2 %. Ozývajú sa aj kritické hlasy nezávislých expertov, ktorí ich nepovažujú za obnoviteľné a zároveň negatívne hodnotia ich rivalitu s produkciou potravín a krmiva. Aj z týchto dôvodov sa experimentuje s udržateľnejšími biopalivami, ktoré by nesúperili s produkciou jedla.

Takýmito palivami sú aj tie vyrobené z mikrorias (*pozn. autora: slová riasa a mikroriasa sú v práci pre zjednodušenie, pre oko biológa nie korektne, používané ako synonymá*). Hlavným cieľom výskumu a vývoja (R&D - z angl. *Research & Development*) v tomto poli sú palivá tekuté, keďže tieto sú v popredí záujmu hlavne zo strany leteckého priemyslu, v porovnaní s palivami pevnými či plynými R&D mikrorias je v nedávnej dobe zameraný aj na produkciu krmív, potravín, hnojív, chemikálií a vysokohodnotných špeciálnych produktov, či spracovanie odpadových vôd. Aby mohli byť procesy spojené s kultiváciou mikrorias považované za obnoviteľné, musia vykazovať výraznú netto redukciu CO₂ emisií a nevyčerpávať ďalšie neobnoviteľné zdroje. Plány s kultiváciou mikrorias zahŕňajú vízie o vysoko produktívnych procesoch, ktoré konvertujú solárnu energiu na vysoké množstvá biomasy, čo by následne prinieslo desiatky tisícov litrov etanolu, biodieselu, bio leteckého paliva a ďalších, na hektár za rok. Produkcia biopalív z mikrorias by tiež mohla byť cenovo nízka a potenciálne by sa pri nej mohla využívať odpadová či morská voda. S ohľadom na znižovanie emisií atraktivita tohto procesu spočíva v jeho potrebe prísunu koncentrovaného CO₂ najpravdepodobnejšie z elektrární využívajúcich fosílnu palivo. V súčasnej dobe sú dáta získavané z malých projektov za krátke časové obdobia a následne extrapolované na väčšie rozsahy. [3]

1.2 Priemysel s mikroriasami

Ešte pred nedávnym nárastom záujmu o výrobu palív vzniklo v Japonsku v šesťdesiatych rokoch minulého storočia malé odvetvie priemyslu s mikroriasami. Zamerané bolo na kultiváciu riasy s názvom *Chlorella* a výrobu doplnkov stravy z nej. V dnešnej dobe sa riasy pestujú autotrofne (energia je prijatá zo slnečného žiarenie a CO₂ z atmosféry alebo z ďalšieho zdroja) v otvorených nádržiach či vo fotobioreaktoroch a taktiež heterotrofne vo fermentoroch (cukry sú zdroj energie a tiež uhlíka). Ďalším významným druhom mikrorias je *Spirulina* pestovaná výhradne autotrofne. Používa sa z väčšej časti opäť na produkciu doplnkov stravy avšak známa je tiež ako zdroj prírodného potravinárskeho farbiva – fykocyanínu. Medzi najpopulárnejšie produkty patrí doplnok s názvom astaxanthin (druh kartenoidu – organického pigmentu) známy pre svoje antioxidantné účinky.

Štúdie v prvej polovici 20. storočia zaoberajúce sa efektivitou fotosyntézy odhadli, že na redukciiu jednej molekuly CO₂ je potrebných asi 10 fotónov. Táto, v porovnaní s konvenčnými rastlinami vysoká produktivita viedla k experimentovaniu s mikroriasami ako so zdrojom rastlinného oleja, palív a potravín. Následkom globálneho nedostatku potravín po druhej svetovej vojne sa začalo experimentovať s masovou produkciou mikrorias. Práve s prvými pokusmi sa objavili komplikácie a výzvy, ktorým sa R&D venuje dodnes a to napríklad produktivita biomasy, patogény, zber a spracovanie biomasy z rias a tiež návrh a funkčnosť nízkorozpočtových kultivačných systémov. O niečo neskôr sa potom objavila myšlienka dodávať riasam oxid uhličitý vo forme spalín z uhoľných elektrární, ktorej realizácia by redukcii spalín jednoznačne pomohla, je ale nevyhnutné sa najskôr vysporiadať s vysokými nákladmi takéhoto riešenia.

Zvýšený záujem o mikroriasy v poslednej dekáde v spojení so snahou o zmiernenie emisií CO₂ viedli k značným investíciám zo súkromného sektora. Pridali sa aj vlády, najmä USA, Japonsko, Kórea, Čína či Európska Únia, ktoré investujú do výskumu a vývoja technológií cieliacich na zníženie emisií a výrobu biopaliva. Nízke ceny fosílnych palív však sťažujú presadenie sa viacerých firiem na trhu. Prípadom je aj jeden z prvých startupov v tomto odvetví GreenFuel Technologies, ktorý po piatich rokoch existencie skončil svoje fungovanie so stratou 70 miliónov dolárov a tým priniesol pre mnoho iných firiem zmenu priorit. Začali sa preorientovať z produkcie palív na produkciu vysokohodnotných produktov, zväčša výživových doplnkov. Vplyvom prísunu nových producentov sa začala znižovať aj hodnota astaxanthinu, ktorého cena za tonu sa dlho držala na hodnote 10 miliónov dolárov. Momentálne sa spoločnosti

majoritne zameriavajú na nahradenie purifikovaného rybieho oleja, ktorý sa predáva ako výživový doplnok a ktorý by potenciálne mohol byť zastúpený olejom z mikrorias.

Už spomenutá produktivita biomasy vyjadruje celkovú efektivitu fotosyntézy dosiahnutú konkrétnym druhom riasy. Táto efektivita závisí na genetických vlastnostiach buniek rias a ich reakcie na podmienky v kultivačnom prostredí. Teplota, vysoké koncentrácie O₂ či fluktuácie v množstve prijatého svetla sú hlavnými faktormi. Posledný spomenutý problém je zapríčinený miešaním média v nádrži a vzájomným tienením. Je preto kľúčový výber správneho druhu rias. Ďalšie zvýšenie produktivity (až 10-násobné) je dosiahnuteľné prívodom CO₂. Týmito opatreniami je síce proces možné zefektívniť, avšak len do určitej hranice. Aby sa tento limit prekonal, bude potrebné riasy geneticky modifikovať, keďže sa prirodzene vyvinuli na prijímanie malého množstva svetla skladaním veľkých svetlo-zachytávajúcích pigmentových útvarov („antén“), ktoré však nie sú efektívne pri väčších množstvách svetla. Zmenšenie antén by zredukovalo straty fotónov v čase okolo poludnia. Tento prístup by mohol zvýšiť efektivitu fotosyntézy až dvojnásobne.

Či sa jedná o doplnky stravy alebo náhradu fosílnych palív, priemysel s mikroriasami sa nachádza vo formujúcej fáze. Je však zrejmé, že má potenciál uplatniť sa na už existujúcich trhoch, či dokonca vytvoriť nové. Všetky tri základné kultivačné spôsoby – otvorené nádrže, fotobioreaktory a fermentory – sú vyvíjané v rôznych dizajnoch a konfiguráciách, z ktorých niektoré už našli uplatnenie na priemyselnej úrovni. Bilancia nákladov na fungovanie kultivačných zariadení je jedným z prioritných faktorov. V porovnaní s otvorenými nádržami sú fotobioreaktory jednoznačne nákladnejšie, avšak poskytujú viac kontroly nad parametrami ako je pH či prívod CO₂, a zároveň poskytujú čistejšie prostredie a tým pádom aj výsledný produkt vyššej kvality. [3] V nasledujúcich kapitolách bude preberaná problematika rastu rias, ďalej koncept uzatvorených fotobioreaktorov, úvodom obecné, neskôr konkrétne doskových, ich dizajn, konštrukčné varianty a príklady fungujúce v praxi po celom svete.

1.3 Mechanizmy rastu rias

CO₂, jeho absorpcia a fixácia

Faktormi ovplyvňujúcimi rast mikrorias sú prístup k oxidu uhličitému, svetlu, živinám a koncentrácia rias. Samotné spracovanie CO₂ riasami má dve fázy: jeho absorpciu zo spalín prostredníctvom prenosu hmoty/chemickej reakcie a fixáciu CO₂ fotosyntézou.

Absorpcia CO₂ riasami zo spalín vo vodnom prostredí je dôležitým faktorom. Obecne platí, že CO₂ je vo vode veľmi zle rozpustné. [4] Henryho zákon hovorí, že rozpustnosť plynu je pri konštantnej teplote priamo úmerná parciálnemu tlaku tohto plynu nad kvapalinou:

$$p_i = H_i \cdot x_i \quad (1.1)$$

kde p_i je parciálny tlak zložky i v plynnej fáze, H_i je Henryho konštanta a x_i je molárny zlomok zložky i v kvapalnej fáze. Predpokladom pri ďalej uvedenom experimentálnom určení teoretického absorbovaného množstva CO₂ bolo, že systém je prevzdušňovaný aeračným plynom. Výpočet bol uskutočnený pre dve rôzne koncentrácie a to 0.04 hm. % (aeračný plyn bol v tomto prípade vzduch) a ďalej 15 hm. % (spaliny ako aeračný plyn). Do úvahy boli zobrazené aj zmeny teploty spôsobené svetelným žiarením. Kultivačné médium bola voda a systém funguje pri atmosférickom tlaku. Pre prípad 0.04 hm. % CO₂ bolo v otvorenom systéme na 1 ha zastavanej plochy dosiahnutých 1.4 kg rozpusteného CO₂ (teplota bola 15°C). Pre obsah 15 hm. % CO₂ to bolo až 500 kg. S klesajúcou teplotou média sa zvyšuje rozpustnosť CO₂. Nastavenie teploty je závislé od druhu pestovaných rias; pre prípad druhu *Chlorella* je rozsah teplôt 15 až 45°C. [5]

Pod pojmom fixácia CO₂ sa rozumie jeho príjem riasami pre ich následný rast. Jeden gram riasovej sušiny vyžaduje 1.65-1.83 g CO₂. [4] Táto hodnota vychádza z poznatku, že jeden mol CO₂ má hmotnosť 44 g, z čoho 12 g je tvorených uhlíkom. Uhlík pritom tvorí takmer 50 % celkovej hmotnosti sušiny rias. Vyjadrené vzťahom [5]:

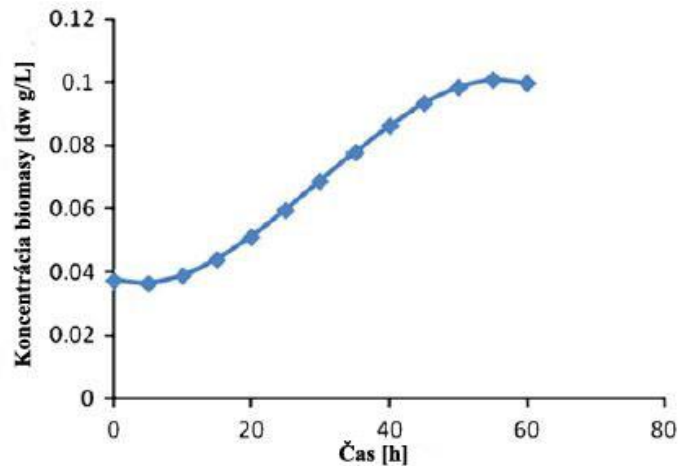
$$\frac{44 \text{ g/mol}_{\text{CO}_2}}{12 \text{ g/mol}_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{0.5 \text{ g}_{\text{uhlík}}}{1 \text{ g}_{\text{rias}}} = 1.83 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{g}_{\text{rias}} \quad (1.2)$$

Fixácia uhlíka sa zvyšuje len so zvyšovaním dĺžky pobytu CO₂ v bioreaktore. Keďže doba fixácie CO₂ v riasach je konštantná, je potrebné prispôbiť dobu absorpcie v danom reaktore. Čas absorpcie CO₂ zo vzduchu/spalín vo vode a čas fixácie CO₂ by mal byť približne rovnaký. [4]

Koncentrácia rias

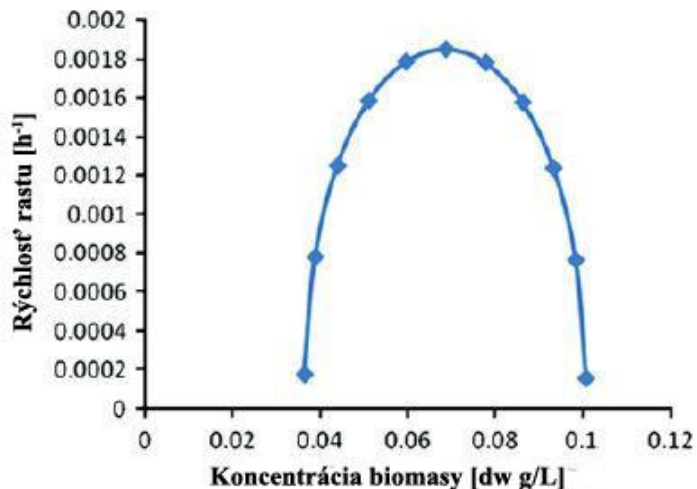
Pre akúkoľvek koncentráciu CO₂, svetla a živín platí, že riasy prechádzajú všetkými fázami rastu, t.j.: (I) kludovou fázou (lag fáza), (II) exponenciálnou fázou (log fáza), (III) stacionárnou fázou a (IV) fázou odumierania. Pre minimalizovanie lag fázy, by mali bunky byť na kultivačné médium prispôbené už pred inokuláciou (očkovaním). Počas exponenciálnej fázy sa bunky rýchlo rozmnožujú a ich hustota sa s časom exponenciálne zvyšuje. Experimentálne dáta zobrazujúce rast rias druhu *Scenedesmus* sú ukázané na Obr. 1. Na zvislej

osi je zobrazená koncentrácia biomasy ako váha sušiny (z angl. *dry weight* – dw) na liter objemu. Na vodorovnej osi je čas v hodinách, pričom krivka zobrazuje všetky fázy rastu. Objem reaktora použitého v experimente bol 70 L, zdrojom energie bolo slnečné žiarenie a organizmom boli dodávané živiny - dusík, fosfor a draslík.



Obr. 1 – Rastová krivka riasy druhu *Scenedesmus* [4]

Z rovnakého experimentu vzišli aj dáta zobrazené na Obr. 2, ktorý ukazuje rôzne koncentrácie sušiny (na vodorovnej osi) a tempo rastu na osi zvislej [h^{-1}]. Graf indikuje optimálnu koncentráciu a ukazuje, že rýchlosť rastu sa zastavila na hodnote 0.0018 h^{-1} .



Obr. 2 – Rýchlosť rastu rias ako funkcia koncentrácie biomasy – krivka má tvar konkávnej paraboly [4]

Toto správanie je možné pripísať autokatalytickej reakcii. Tempo rastu je priamo závislé od bunkovej koncentrácie a reprodukcia buniek je prirodzený výsledok tejto reakcie. Keď je

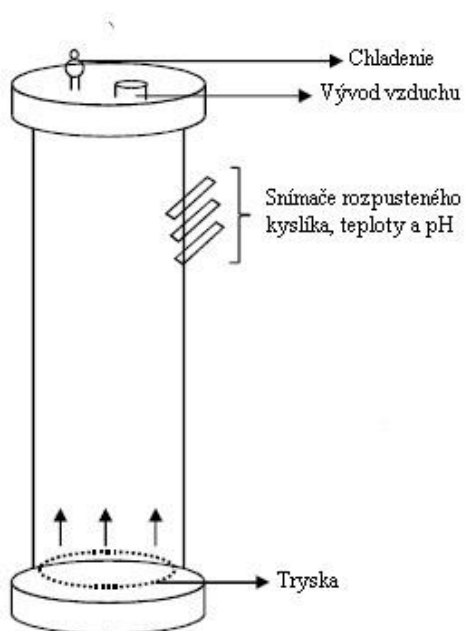
počiatočná koncentrácia rias menšia v porovnaní s absorbovaným svetlom a CO₂, tempo rastu sa zvyšuje až do bodu optimálnej koncentrácie. Následne sa vplyvom mýňania CO₂ a potrebných živín tempo rastu zníži spoločne s koncentráciou rias. [4]

2 Fotobioreaktory

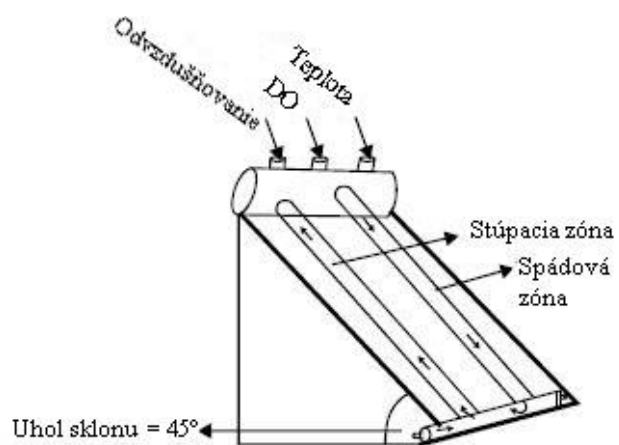
Fotobioreaktor (ang. *Photobioreactor* – PBR) môže byť definovaný ako uzatvorená osvetlená nádoba navrhnutá za účelom kontrolovanej produkcie biomasy. Je to uzatvorený systém, v ktorom je silne limitovaná výmena plynov a kontaminantov s vonkajším prostredím. [6] Variácia definície fotobioreaktora hovorí o systéme kultúr fototrofných organizmov, v ktorých fotóny, hlavný zdroj energie pre ich rast, nenarážajú priamo na povrch týchto kultúr, avšak musia prejsť cez transparentné steny reaktora pred tým, ako sa k bunkám organizmov dostanú. [7]

Spoločným menovateľom uzatvorených systémov sú ich vlastnosti riešiace nedostatky otvorených nádrží a kanálov. Dôležitou výhodou je riadenie prevádzkových podmienok (teplota, pH, CO₂), vďaka čomu je dosahovaná vyššia produktivita kultivácie rias. Ďalším pozitívom je zabránenie kontaminácie kultivačného média, a tým pádom možnosť pestovania citlivejších druhov rias, ktoré by v otvorených systémoch neprežili. [5]

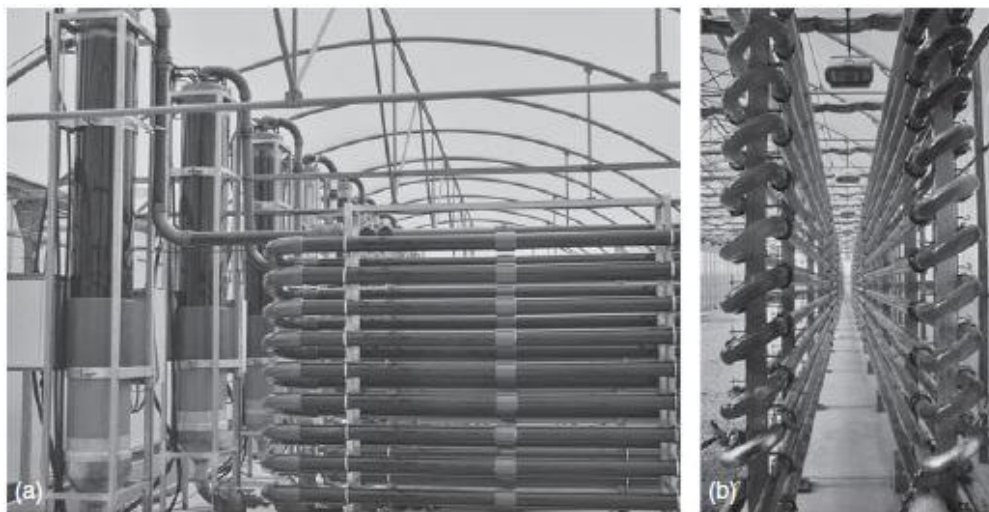
PBR sa dajú klasifikovať podľa dizajnu a operačného módu. Čo sa týka dizajnu, hlavné kategórie sú: (I) plochý (Obr. 9) alebo valcový (Obr. 3) (II) horizontálny, naklonený (Obr. 4), vertikálny alebo špirálový, (III) rozvetvujúci sa (Obr. 6) alebo serpentínový (Obr. 5), (IV) hybridný, (V) plávajúci (Obr. 40) a nakoniec (VI) biofilmový (Obr. 7) reaktor. Odkedy sa vyskytli fóliové bioreaktory sú rozdiely medzi spomenutými kategóriami menej jednoznačné. S ohľadom na operačný mód poznáme tieto druhy reaktorov: (i) miešajúce vzduchom alebo čerpadlom, (ii) jednofázové (naplnené médiom, kde sa výmena plynov odohráva v osobitnom výmenníku plynov) alebo dvojfázové (v ktorých sú plyn aj kvapalina, a kde nepretržitá výmena plynov prebieha v samotnom reaktore). Dodatočne je možné delenie na základe použitého konštrukčného materiálu do subkategórií: (I) sklo alebo plast a (II) tuhé alebo flexibilné PBR. [7]



Obr. 3 – Valcový fotobioreaktor [8]



Obr. 4 – Naklonený trubkový fotobioreaktor [8]



Obr. 5 – Vertikálne trúbkové serpentinové fotobioreaktory – (a) na univerzite v meste Almeria (Španielsko); (b) v spoločnosti Microphyt (Francúzsko) [7]



Obr. 6 – Rozvetvujúci sa horizontálny trubkový fotobioreaktor [7]



Obr. 7 – Rotujúci biofilmový reaktor na Iowskej štátnej univerzite (USA) [9]

2.1 Obecné faktory pri návrhu fotobioreaktorov

Účinnosť PBR je daná integráciou zachytávania svetla, jeho transportom, distribúciou a užitím samotnými riasami na fotosyntetický proces. Efektívny dizajn reaktora by mal spĺňať nasledovné vlastnosti: (i) zachytiť čo najviac svetla a následne ho transportovať a rozvieť po celej nádobe tak, aby čo najviac svetelnej energie bolo použitej na tvorenie biomasy; (ii) umožniť pohodlnú a presnú kontrolu dôležitých parametrov; (iii) zredukovať kapitálne a operačné náklady; (iv) minimalizovať energetickú spotrebu počas kultivačného procesu. [10]

Zachytávanie, distribúcia a využitie svetla

Intenzita svetla hrá v procese fotosyntézy kľúčovú úlohu. Svetelná limitácia môže nastať pri nízkej intenzite svetla, je zároveň vhodné poznamenať, že svetelnú saturáciu a fotoinhibíciu môže spôsobiť aj intenzita svetla prekračujúca kritickú hranicu. [10] Svetelná energia je vyjadrená hustotou toku fotónov [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$] (z ang. *Photon flux density* – PFD). Príliš vysoká PFD vedie k poškodeniu kultúr a zníženiu fotosyntetickej kapacity. [4] Nastať môže fotoinhibícia zvratná či nezvratná, závisiac od svetelného stresu a doby vystavenia rias tomuto stresu. Svetelná inhibícia by mala byť v navrhovanom reaktore limitovaná čo najviac.

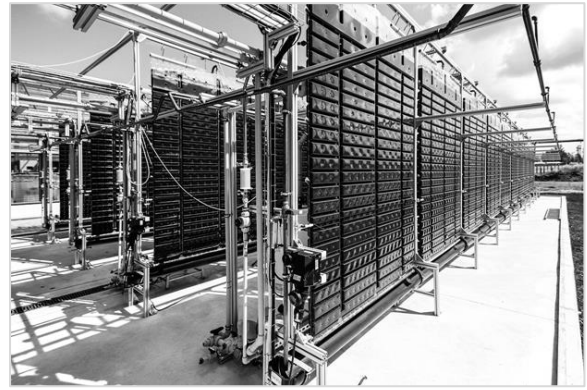
Spektrálna kvalita svetla je ďalším dôležitým faktorom pri navrhovaní PBR. Slnečné žiarenie pokrýva široké svetelné spektrum, avšak iba žiarenie o vlnových dĺžkach od 400 do 700 nm je fotosynteticky aktívne (ang. *Photosynthetically active radiation* – PAR). PAR tvorí približne 50 % slnečného žiarenia. Existuje preto prirodzená bariéra pre zvýšenie účinnosti fotosyntézy a táto je ďalej znížená kvôli reflexii svetla a bunkovej respirácii.

Striedanie dňa a noci má taktiež výrazný efekt na výslednú produkciu biomasy, keďže nedostatok svetla počas nočného cyklu núti riasy k respirácii, výsledkom čoho môže byť potenciálna strata až 42 % biomasy vytvorenej počas dňa. Respirácia počas noci by mala byť teda čo najviac obmedzená. V kontrolovaných kultivačných systémoch sa bežne počas dňa nachádza odlišná svetelná a tmavá fáza. Kvôli svetelnému gradientu vnútri PBR sú riasy vystavené rozličným mikroprostrediam, od presvetlenej časti pri stenách reaktora k tmavej časti v strednej oblasti. [10] Výsledkom tohto javu sú riasy vystavené určitým svetelným/tmavým fázam, charakterizovaným dvoma parametrami: svetelnou frakciou a trvaním fázy. Svetelná frakcia je čas, počas ktorého sú riasy vystavené svetlu, delený celkovým časom svetelnej/tmavej fázy. Trvanie fázy je čas, počas ktorého sú bunky rias vystavené tmavej fáze. Bolo dokázané, že dlhé svetelné/tmavé fázy môžu mať negatívny efekt na bunkový rast a využitie svetla, avšak tento negatívny efekt bol eliminovaný skrátením fázy. [10] Experimenty potvrdili, že svetelné/tmavé fázy v rozmedzí 10-100 s by mali mať značný vplyv na účinnosť využitia svetla. Tmavá fáza by pritom mala byť limitovaná na približne 20 % celkového času na dosiahnutie rovnakého vyťaženia svetelnej energie ako za stáleho osvetlenia pri rovnakej PFD. Z hľadiska šírenia svetla je pre potreby rias dostačujúca hĺbka 15 cm, ako je to v čistej vode. Bioreaktor dovoľuje riasy pestovať len na vrstve niekoľkých mm, pričom hustota zberu je viac ako 30 g/L. Tento výsledok naznačuje, že ak je voda rozprestretá na rozľahlejšej ploche v podobe tenkého povlaku, absorpcia fotónov by mala byť dobrá. Čas, za ktorý je požadované množstvo fotónov pohltené je teda závislý od hrúbky vodnej vrstvy a koncentrácie mikrorias. [4]

Najdôležitejším dizajnovým faktorom ovplyvňujúcim zachytávanie svetla je priehľadnosť materiálu a pomer povrchu/objemu (osvetlený povrch/objem média). V súčasnosti najpoužívanejšie materiály sú sklo, plexisklo, polyvinylchlorid (PVC), akrylátové PVC a najčastejšie polyetylén. Tieto materiály spĺňajú požiadavku na priehľadnosť a ich mechanické vlastnosti dovoľujú použitie pri stavbe PBR. Každý z nich má svoje klady a zápory, ktoré je nutné pred použitím vyhodnotiť. Napríklad sklo, s veľmi dobrou priehľadnosťou, je vhodnejšie pre stavbu menších PBR, keďže pri väčších rozmeroch vyžaduje podporné konštrukcie, navyšujú tak náklady. Schopnosť materiálu zabraňovať vzniku biofilmu je tiež kľúčovou vlastnosťou. Biofilm sa nielenže zložito čistí, ale tiež zhoršuje priestupnosť svetla cez PBR. Za dizajnové varianty poskytujúce najväčší pomer povrchu/objemu sú v dnešnej dobe stanovené reaktory doskové (Obr. 9) a trúbkové (Obr. 8) a aj preto sú najvhodnejšími a najpoužívanejšími v priemyselnej produkcii biomasy z rias. [10]



Obr. 8 -Trúbkový fotobioreaktor [5]



Obr. 9 -Doskový fotobioreaktor [5]

Vyváženie pomeru CO_2/O_2 a výmena plynov

Fotosyntéza používa svetelnú energiu na zachytenie CO_2 a uvoľnenie O_2 ako vedľajšieho produktu. Je však dôležité levely rozpusteného kyslíka (angl. *Dissolved Oxygen* – DO) kontrolovať, keďže jeho vysoké hodnoty sú pre bunky rias toxické. Bolo zaznamenané, že akumulácia kyslíka generovaného pomocou fotosyntézy môže viesť k výraznej inhibícii rastu rias. Čo sa týka obsahu CO_2 , jeho nedostatočná koncentrácia v privádzanom plyne (ak je ním napríklad vzduch) je limitujúcim faktorom, ale taktiež nedostatočné premiešavanie má podobné účinky. Na druhú stranu vysoké koncentrácie rozpusteného CO_2 (dCO_2 z angl. *dissolved CO_2*) by znamenali zníženie pH, čo by následne viedlo k inhibícii niektorých buniek. Preto je dôležité udržiavať hladinu dCO_2 ako aj DO na optimálnych hodnotách.

Na toto slúži vyhradený priestor na výmenu plynov. Ďalšími efektívnymi prostriedkami sú mechanizmy na premiešanie, vytvorenie turbulencií, a tým podporenie prenosu hmoty medzi plynnou a kvapalnou fázou. Nakoniec je to aj obohacovanie oxidom uhličitým či/a odstraňovanie O_2 , ktoré vedú k zlepšeniu vyváženého pomeru dCO_2/O_2 . [10]

Teplota

Svetelné a priestorové požiadavky pestovania rias implikujú, že komerčné kultivovanie sa pravdepodobne bude odohrávať vonku a tým budú kultúry vystavené ako denným a nočným teplotným zmenám, tak aj tým sezónnym. Bolo ukázané, že bez regulačného mechanizmu sa môžu teploty kultúr v uzatvorených PBR vyšplhať až na hodnoty o 10-30 °C vyššie v porovnaní s okolím. Medzi takéto mechanizmy patrí napríklad ponorenie reaktorov do vodných nádrží, kropenie vodou, tienenie, či inkorporácia tepelného výmenníka. [10]

Hodnoty pH

Optimálne pH pre väčšinu pestovaných druhov rias sa pohybuje v rozmedzí 7-9. Niektoré druhy sa však viac prikláňajú k zásaditému či naopak kyslému pH. Napríklad pre rast druhu *Spirulina* je tento rozsah 8.0-10.0. Výraznejší výkyv pH by mal za následok kolaps celého prostredia rias, je z toho dôvodu nutné tento parameter kontrolovať. [10]

Miešanie

Hustota mikrorias v ich prirodzenom prostredí je asi 10^3 buniek/ml a vzájomná vzdialenosť buniek je viac ako 1000 μm , avšak v kultúrach s vyššou hustotou môže byť táto hodnota až 10^9 buniek/ml, kvôli čomu sa výrazne zhoršuje prenos svetla, zvyšuje akumulácia DO, a tiež sa zvyšuje teplota prostredia. Miešanie je preto dôležitým prvkom pri navrhovaní PBR, konkrétne z nasledujúcich dôvodov: (i) zabránenie sedimentácii; (ii) zaistenie rovnomerného vystavenia všetkých buniek svetlu a živinám; (iii) zjednodušenie prenosu tepla a zabránenie tepelnej stratifikácie; (iv) zlepšenie výmeny plynov medzi kvapalným médiom a plynnou fázou.

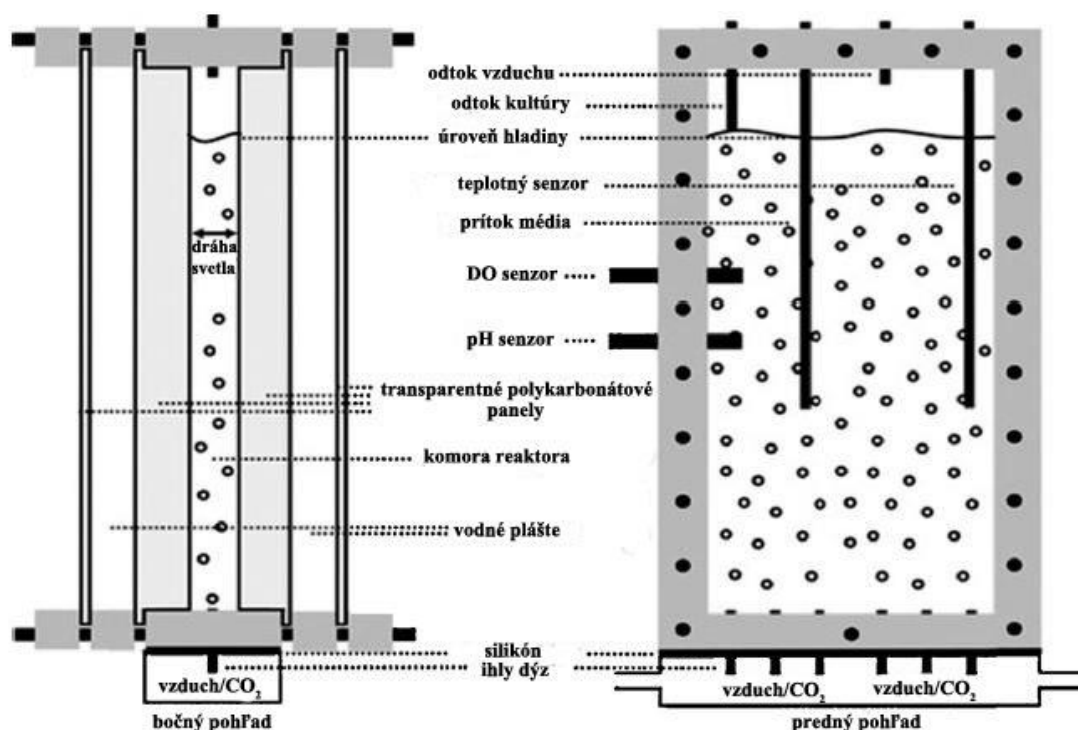
V závislosti od veľkosti a typu kultivačného systému môže byť miešanie dosiahnuté aeráciou, čerpaním, mechanicky alebo ich kombináciou. Treba však brať ohľad na intenzitu miešania, keďže pri vyššej intenzite by mohol byť obmedzený rast niektorých druhov rias. [10]

Možnosť čistenia

Vyčistiteľnosť PBR je dôležitá z nasledujúcich dôvodov: (i) zabránenie tvorenia biofilmu na stenách PBR, ktorý zabraňuje priestupnosti svetla; (ii) minimalizovanie možnosti kontaminácie. Za týmto účelom by sa malo prihliadať k hladkému vnútornému povrchu PBR, minimalizovaniu záhybov a dostatočne priestranným vnútorným rozmerom pre uľahčenie čistenia. [10]

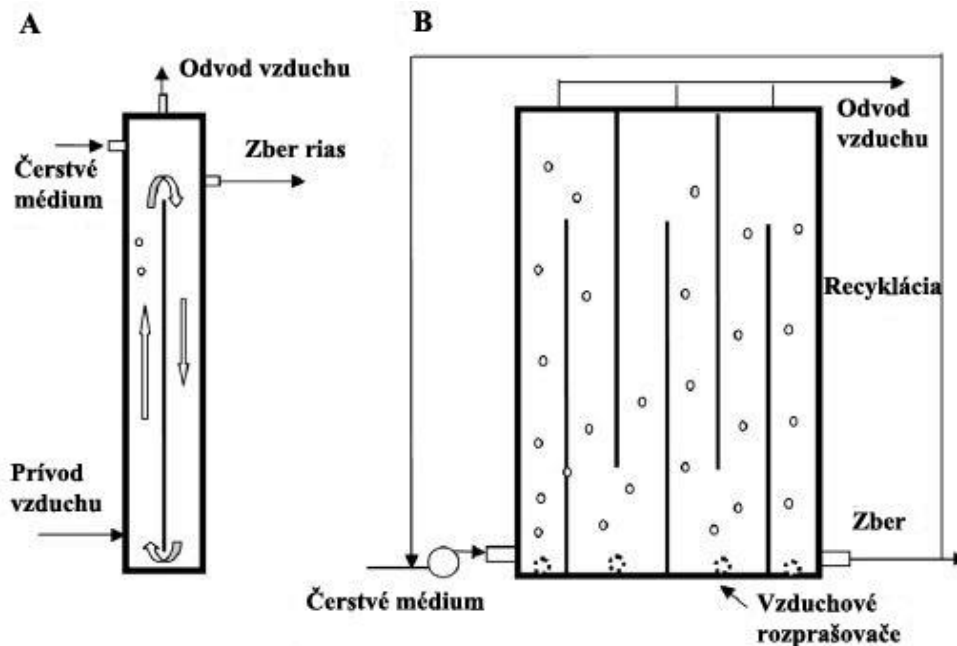
2.2 Doskové fotobioreaktory

Doskové fotobioreaktory (FPBR z angl. *Flat Panel Photobioreactor*) (Obr. 10) sú uzatvorené PBR charakteristické vysokým pomerom osvetlenej plochy k objemu. Môžu byť orientované tak, aby na nich svetlo dopadalo priamo a tým pádom boli vystavené maximálnej svetelnej energii. [6]



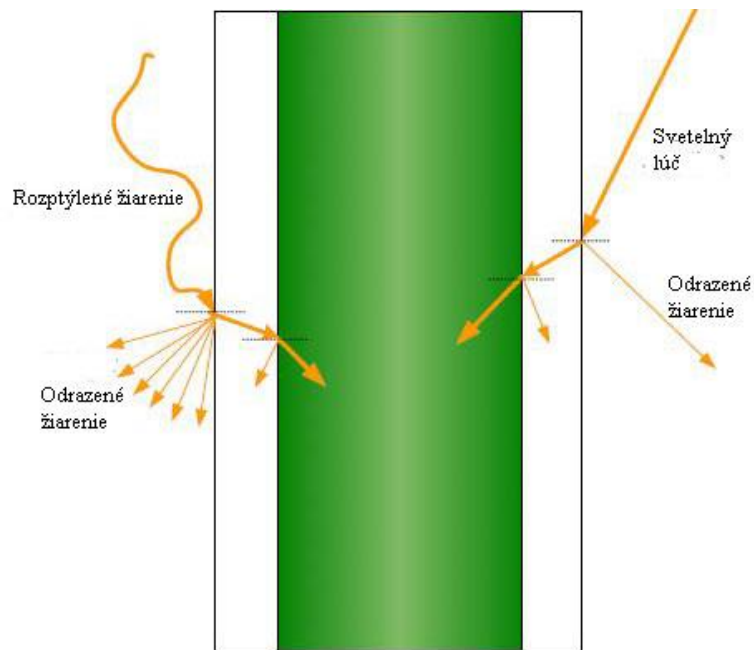
Obr. 10 – Bočný a predný pohľad na doskový fotobioreaktor [6]

Jedno z rozdelení FPBR je podľa spôsobu miešania média. Na Obr. 11 je znázornený variant tzv. „airlift“ fotobioreaktora (A) a fotobioreaktora, kde je miešanie docielené za použitia čerpadla (B). V čerpadlom poháňanom FPPBR je kvapalina čerpaná, a tým je zabezpečená dostatočná turbulencia na premiešanie média. „Airlift“ (Obr. 33) fotobioreaktor využíva potenciál stlačeného vzduchu na dosiahnutie potrebného premiešania. [10] Reaktory tohto typu sú zložené z dvoch prepojených zón, v jednej je vzduch zospodu privedený do média, a tak je znížená jeho hustota. Vďaka tomuto sa kvapalina pohybuje smerom hore, pričom bubliny vzduchu zároveň médium premiešavajú. V hornej časti FPBR je tzv. uvoľňovacia zóna, kde väčšina predtým privedeného vzduchu reaktor opúšťa. V tomto momente sa médium dostáva do druhej časti nádoby, kde zbavené vzduchu tečie laminárnym tokom smerom dole a tým uzatvára obch. [6] Deliť je ich možné tiež na tradičnejšie reaktory s tuhými panelmi a inovatívnejšie reaktory z flexibilných fólií, podľa týchto parametrov sú v neskoršom texte (sekcia 2.2.2) rozdelené fotobioreaktory, ktoré boli skúšané v praxi. [7]

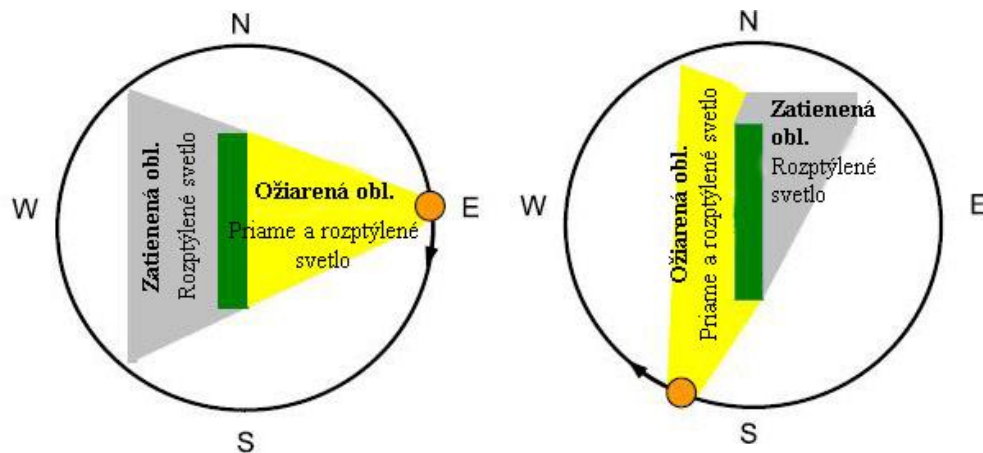


Obr. 11 – Schéma doskového fotobioreaktora; A – „airlift“ variant, B – médium hnané čerpadlom [10]

Hlavnými dôvodmi pre použitie doskového reaktora sú priaznivý pomer osvetlenej plochy k objemu média, možnosť regulácie uhlu dopadu žiarenia na plochu reaktora (Obr. 12), či možnosť kompaktného uloženia do radov blízko od seba – dobrý pomer ožiarenej plochy a zastavanej plochy. Experimentálne bolo zistené, že pre zvýšenie produkcie biomasy v letnom období je ideálny uhol sklopenia doskového reaktora (voči zemi) 10° a 30° . V období zimnom sú to uhly väčšie, okolo 60° . Odlišný pokus ukázal, že orientácia východ-západ vykázala 1.4 násobne väčší nárast krivky produktivity voči rovnakému ožiareniu ako fotobioreaktor orientovaný smerom sever- juh. [10]



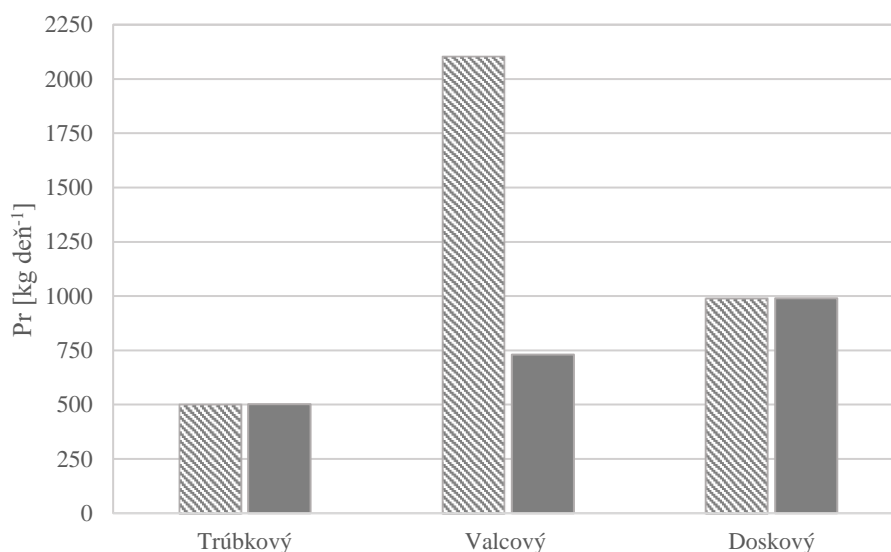
Obr. 12 – Refrakcia svetla cez panel reaktora a svetelné straty v podobe odrazeného žiarenia. [11]



Obr. 13 – Vrchný pohľad na vertikálny doskový fotobioreaktor orientovaný smerom západ- východ. [11]

V odbornej literatúre [5] je uvedený experiment porovnávajúci produktivitu troch najpoužívanějších uzatvorených systémov – doskového, trúbkového a valcového. Doskový reaktor (Obr. 9) bol 1,98 m vysoký, dosky boli vzdialené 50 mm od seba a jednotlivé fotobioreaktory mali rozteč 1 m. Pre tieto parametre bol objem kultivačného média na 1 ha zastavanej plochy 990 m³ a ožiarená plocha bola 39 600 m². Trúbkový variant mal vonkajší priemer trúbky 50 mm s hrúbkou steny 3 mm. Rozteč trubiek v horizontálnom smere bola 60 mm a vzdialenosť jednotlivých radov 1 m, pričom výška radu bola 1,98 m. Pre tento prípad vychádzal objem kultivačného média na 1 ha zastavanej plochy 502 m³ a ožiarená plocha 51 836 m². Parametre valcového reaktora boli nasledujúce: vonkajší priemer 0,28 m; hrúbka steny

10 mm; výška valcov a rozteče medzi nimi podobné doskovému a trúbkovému. Objem kultivačného média 2103 m³ a ožiarená plocha 34 834 m². Porovnanie produktívít (objem bol zvolený tak, aby bol neustále prežiarený) jednotlivých variantov fotobioreaktorov je na Obr. 14. Vo valcovom fotobioreaktore bolo prežiarených iba 34,8 % objemu z celkového spracovaného objemu. Pri doskovom aj trúbkovom to bolo 100 %, pričom doskový dosiahol najväčšiu produktivitu prežiareného objemu a to 990 kg deň⁻¹.



Obr. 14 – Graf zobrazujúci teoretickú produkciu mikrorias na zastavanej ploche 1 ha; šrafované – produkcia v celkovom objeme, vyplnené – produkcia v prežiarenom objeme. [5]

Riasy kultivované v doskovom reaktore sú schopné na 1 ha zastavanej plochy zachytiť najväčšie množstvo CO₂ spomedzi všetkých konštrukčných verzií, a to okolo 1800 kg deň⁻¹. V porovnaní s taktiež často používaným trúbkovým reaktorom sa doskový ukazuje ako finančne (investičné aj prevádzkové náklady) výhodnejší, experimentálne dáta to potvrdili na 3 rôznych lokáciách – v Španielsku, v Holandsku a v Turecku. [5]

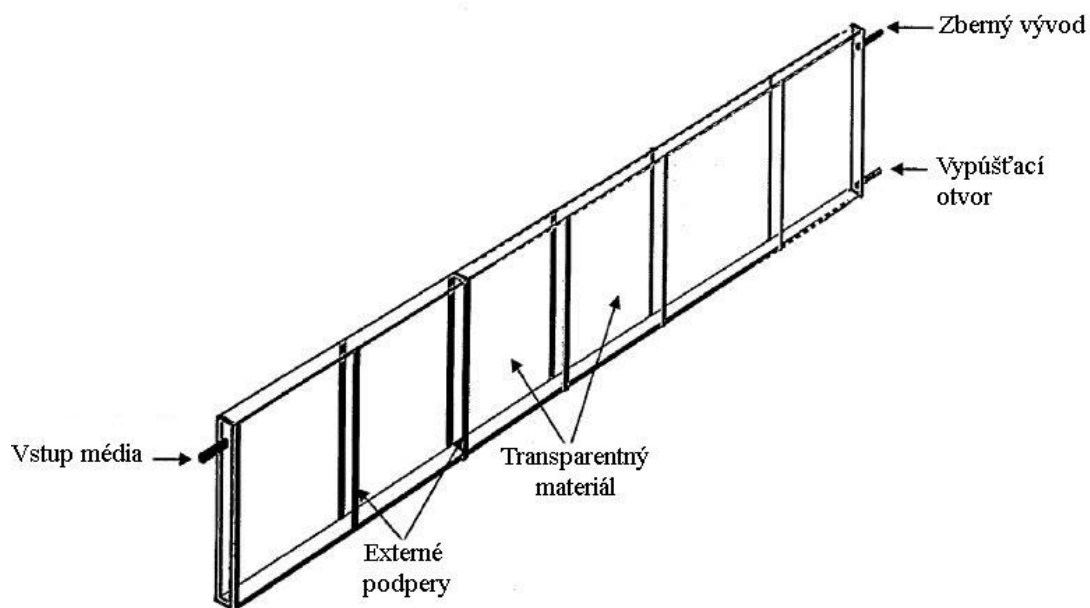
2.2.1 Patentová a koncepčná rešerš

Súpis vybraných patentov týkajúcich sa konštrukčných riešení doskových fotobioreaktorov:

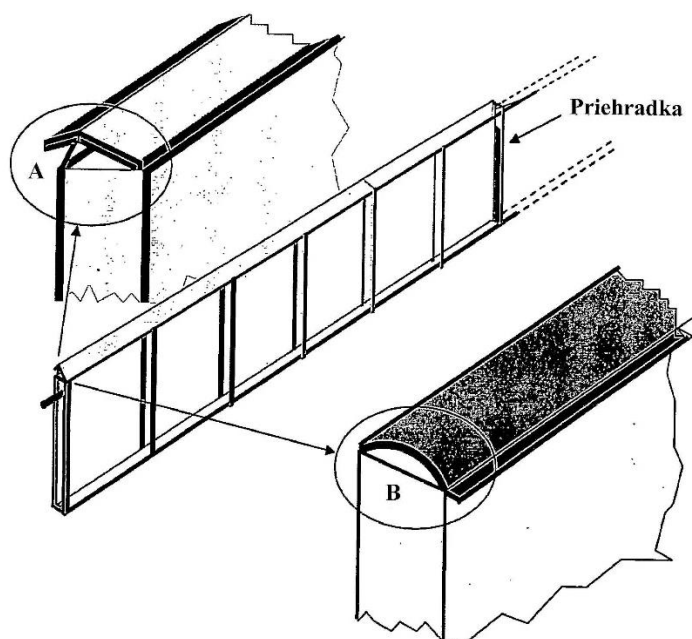
1) HU, Qiang a Milton SUMMERFELD. *Photobioreactor and uses therefor*. USA. US8198076B2. Udelené 12.06.2012.

Autori prezentujú patentovaný koncept ako jedno z možných riešení tradičného problému doskového fotobioreaktora – jeho efektívne využitie na industriálnej úrovni (scale-up). Je tu prezentovaných viacero návrhov, ktoré by mali vydržať vysokokapacitnú kultiváciu rias.

Obr. 15 ukazuje, že reaktor je možné rozšíriť o ďalšie sekcie a navýšiť tak produktivitu. Optimálna vnútorná vzdialenosť medzi panelmi je 20 - 100 mm. Vďaka deleniu na jednotlivé sekcie môže byť teoreticky dĺžka reaktora neobmedzená. Materiál stien môže byť sklo alebo plast. Zadná stena nemusí byť nevyhnutne z priehľadného materiálu, ak nie je priamo vystavená slnečnému žiareniu. Materiál v takomto prípade môže byť nepriehľadný plast, betón, nerezavajúca oceľ, a.i. Materiály spodnej, ako aj vrchnej časti reaktora môžu byť napr. betón, dlaždice, sklo, nerezavajúca oceľ, a pod. Vrchný kryt. pozri Obr. 16, slúži na ochranu pred vniknutím prachu/mikróbov a na zabránenie odparovania. [12]

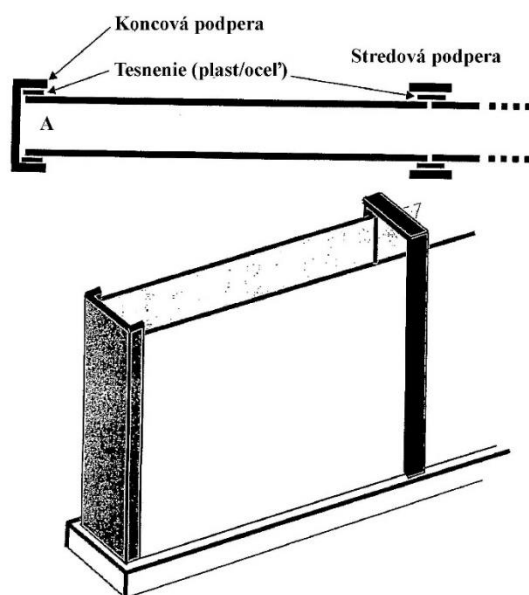


Obr. 15 – Schéma patentovaného doskového fotobioreaktora – jednotlivé sekcie sú spojené v miestach externých podpier. [12]



Obr. 16 – Špicatý a zaoblený variant vrchného krytu reaktora. [12]

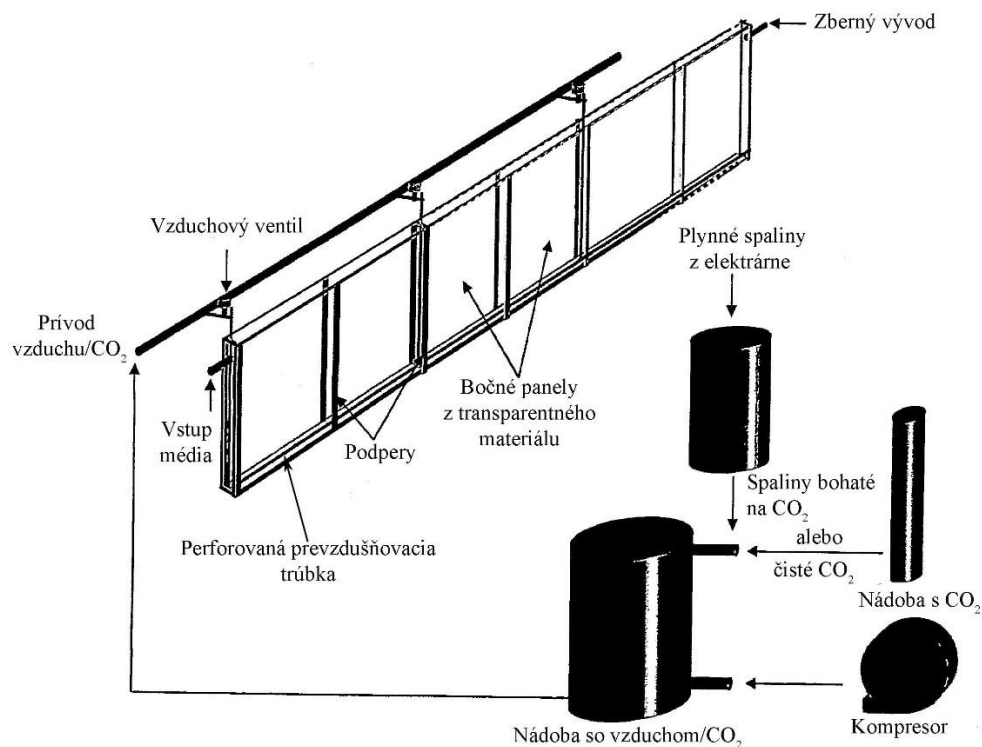
Samotné podpery plnia ako spevňovaciu funkciu, tak aj spojovaciu – ich vnútorná plocha je užitočná na spojenie jednotlivých bočných panelov, pozri Obr. 17, či umiestnenie priehradky. Materiál podpery môže byť pevný plast, betón, keramika a iné. Medzi bočným panelom a podperou (prípadne priehradkou) musí byť tesniaci (guma, plast alebo iné) a zároveň spojovací materiál, napríklad lepidlo, silikón, epoxidová živica a iné. [12]



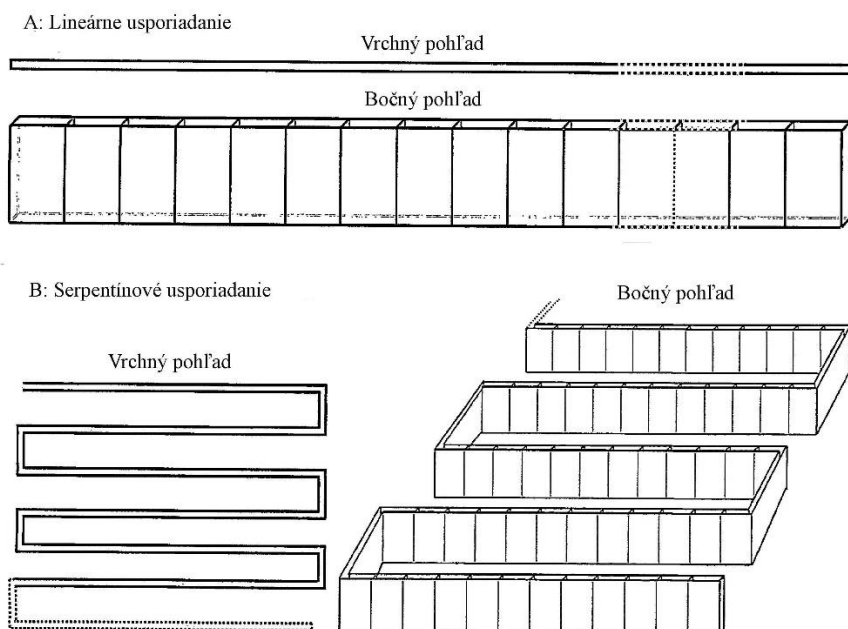
Obr. 17 – Vrchný a celkový pohľad na podpery oddeľujúce jednotlivé priehradky fotobioreaktora. [12]

Otvor pre vstup média do reaktora je umiestnený vo vrchnej časti prvej bočnej podpery, z dôvodu dosiahnutia najväčšej koncentrácie živín blízko vstupu, a najnižšej koncentrácie okolo výstupu. Výstup pre zber je umiestnený na opačnej strane reaktora, tiež vo vrchnej časti a ďalší, vypúšťací, otvor je umiestnený v spodnej časti zadnej podpery, pozri Obr. 15.

Miešanie média a prívod CO_2 sú zabezpečené prostredníctvom perforovanej trubky, do ktorej je privedený stlačený plyn obsahujúci 0,1 % až 20 % CO_2 . Diery v trúbke by mali mať priemer 0,1 – 2,0 mm a byť od seba vzdialené 10 – 50 mm. Zdrojom aeračného plynu môžu byť napríklad spaliny z uhoľných elektrární bohaté na CO_2 , bioplyny ako etanol či metán získané anaeróbnym vyhnívaním odpadových vôd a plyny z ďalších zdrojov. Schéma možného privádzania plynu je uvedená na Obr. 18 a možné usporiadanie reaktorov je zobrazené na Obr. 19. [12]



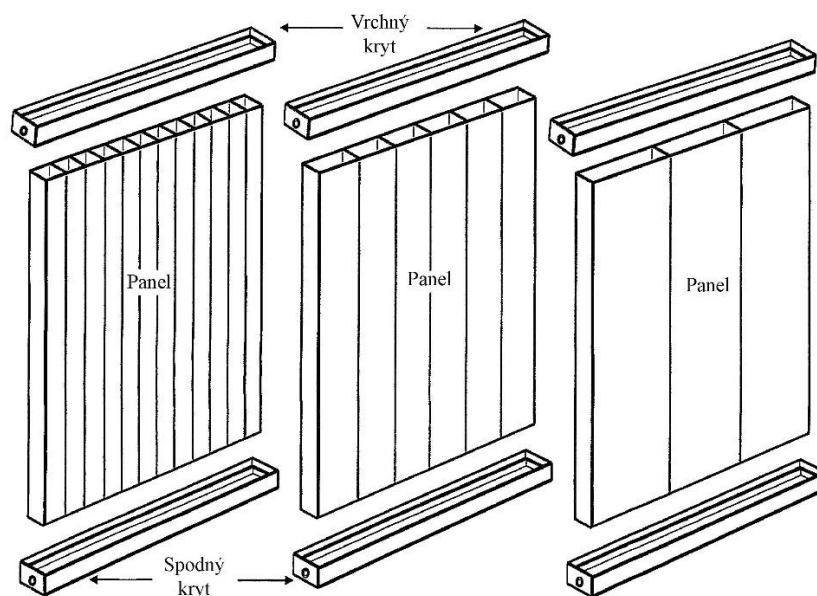
Obr. 18 – Zásobovanie fotobioreaktora zmesou vzduchu obohateného o CO_2 . [12]



Obr. 19 – Možné usporiadania fotobioreaktora. [12]

Druhý dizajn je taktiež modulárny doskový fotobioreaktor. Koncept spočíva v spojení samostatných jednotiek (kontajnerov) do jednej výslednej použítím vrchného krytu, spodného krytu a priehradiek, pozri Obr. 20. Kontajnery, vrchný aj spodný kryt sú vyrobené z plastu. Panely sú vyrobené pomocou extrúzie plastov. Táto technológia umožňuje masovú produkciu kusov za výrazne znížené náklady.

Vrchný a spodný kryt okrem klasickej ochrannej funkcie plnia aj funkciu prepojovacieho kanála pre prúdenie kultivačného média medzi jednotlivými sekciami. Rovnako ako v predchádzajúcom návrhu, je v spodnom kryte umiestnený prevzdušňovací systém založený na rovnakom princípe. Vo vrchnom kryte na nachádza prívod média a na druhej strane reaktora tiež vývodný otvor pre zber biomasy. V spodnom kryte je umiestnený výpustný údržbový otvor.



Obr. 20 – Panelové jednotky rôznych veľkostí. [12]

V oboch návrhoch sa počíta so zavedením snímačov teploty, koncentrácie O_2 , CO_2 a ďalších plynov, rovnako tak aj so zavedením snímačov hustoty média. Uvedená je aj možnosť reaktory umiestniť na naklonenú rovinu a dosiahnuť tak lepšie využitie svetelnej energie. [12]

2) SURYO, Ronald a J.T. WYATT. *Lensed and striped photobioreactors*. USA. US20130230904A1. Zapísané 05.09.2013.

Tento patent je návrh fotobioreaktora s modifikovaným povrchom panelov pre zvýraznenie svetlých a tmavých svetelných cyklov. Kontinuálna zmena intenzity svetla podporuje rast biomasy – efekt svetlého/tmavého cyklu. Príveľa svetla má za následok fotoinhibíciu a následné zníženie produktivity. Vystavenie rias svetlým/tmavým zónam zvyšuje celkovú rastovú produktivitu o 20 % a viac, v niektorých prípadoch až o 100 %. Produktivitu ešte viac zvyšuje rýchly presun medzi svetlými a tmavými zónami. Riasy prijímajú všetko dopadajúce svetelné žiarenie, avšak nevyužívajú všetky fotóny. Nevyužitá svetelná energia sa mení na tepelnú energiu. Vystavovanie rias svetlým/tmavým zónam v intervaloch 1-10 ms, v závislosti od druhu mikroriasy, zvyšuje efektivitu spracovania fotónov.

Spomenutý efekt by mal dosiahnuť fotobioreaktor s osadenými konvexnými alebo/a konkávnymi šošovkami. Konkávnosť či konvexnosť šošoviek smeruje dopadajúce svetlo na presné miesto v komore reaktora a tým vytvára niekoľko svetlých a tmavých zón. Podobnú funkciu môže mať použitie svetelne nepriepustného materiálu na povrchu panelov.

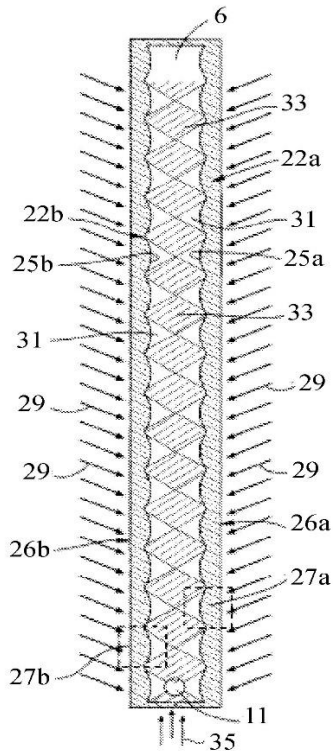
Počet, umiestnenie a tvar svetlých/tmavých zón sú regulované vzorom použitého materiálu (pásiky, mriežka, atď.). [13]

Fotobioreaktor obsahujúci šošovky

Steny reaktora sú vyrobené buď zo skla, alebo plastového materiálu. Šošovky môžu byť umiestnené na vonkajšom, vnútornom alebo oboch povrchoch stien, vonkajšia strana však poskytuje lepšiu možnosť čistenia. Umiestnenie šošoviek do paralelných radov zabezpečuje striedanie svetlých/ tmavých zón pri prúde média. Obr. 21 ukazuje rez doskovým fotobioreaktorom a charakteristiku refraktovaného svetla. Steny sú vyrobené z hladkého, tuhého, priehľadného materiálu, vonkajší povrch je hladký, vnútorný je zahnutý a spolu tvoria sériu náprotivných ploskovypuklých šošoviek 27a, 27b. Dopadajúce svetlo je smerované tak, že tvorí svetlé zóny 31, a tak vznikajú aj (na obrázku šrafované) tmavé zóny 33. Bubliny plynu sú zdola hnané cez trysku 11 a spôsobujú tak premiešavanie média a jeho prechod cez striedajúce sa svetlé/tmavé zóny. Ideálne rozmery šošovky môžu byť zistené podľa rovnice:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_{mat}}{n_{med}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R} \right) \quad (2.1)$$

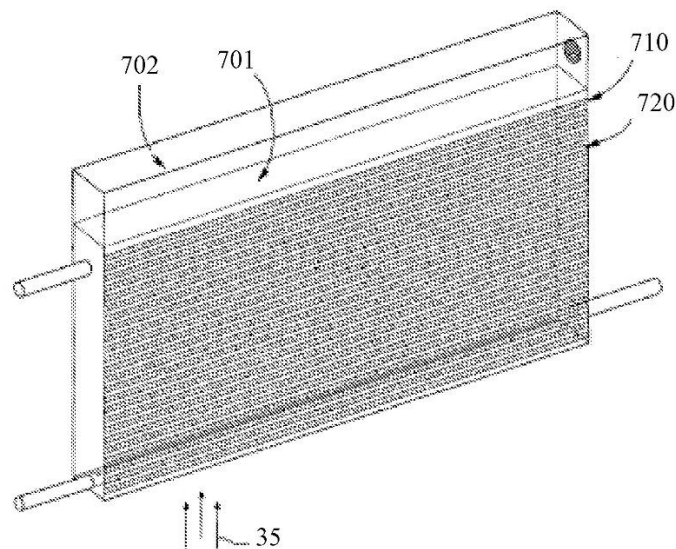
kde f je ohnisková vzdialenosť, n_{mat} je index lomu materiálu steny, n_{med} je index lomu média, R je polomer šošovky. Napríklad pre šírku panela 5 cm a smerovanie svetla do stredu reaktora ($f = 2,5$ cm; $n_{mat} = 1,5$; $n_{med} = 1,33$) je polomer šošovky $R = 0,32$ cm. [13]



Obr. 21 – Bočný rez komory doskového fotobioreaktora so šošovkami: 11 – trysky; 22a – predná stena; 22b – zadná stena; 25a, 25b – vnútorný povrch; 26a, 26b – vonkajší povrch; 27a, 27b – náprotivné ploskovypuklé šošovky; 29 – dopadajúce svetlo; 31 – svetlá zóna; 33 – tmavá zóna; 35 – smer prúdenia média. [13]

Fotobioreaktor s tieniacim materiálom

Ako alternatíva alebo doplnenie hore spomenutého variantu je navrhnutý reaktor s použitím nepriehľadného materiálu na vonkajšej časti jeho stien. Materiál by mal byť úplne svetelne nepriepustný, prípadne reflexný, znižujúc tak teplotu na povrchu reaktora. Jeho umiestnenie závisí na želanom dosiahnutom profile svetlých/tmavých zón vo vnútri reaktora. Môžu to byť napríklad horizontálne umiestnené pásiky potrebnej hrúbky. Navrhnutý variant reaktora je na Obr. 22. Svetlo dopadá na jeho stenu (**701**, **702**), nepreniká cez pásiky tmavého materiálu (**710**) a naopak preniká len cez zostávajúce priehľadné časti (**720**), tvoriac tak v reaktore striedajúce sa svetlé a tmavé zóny. V spodnej časti reaktora je perforovaná aeračná trubka, cez ktorú prúdi do komory smerom hore (**35**) stlačený vzduch zmiešaný s CO₂. [13]

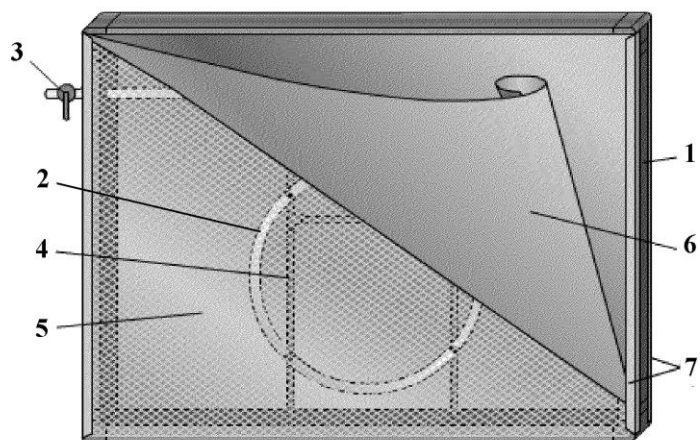


Obr. 22 – Doskový fotobioreaktor s páskami nepriehľadného materiálu na stenách panelov. [13]

3) FERNANDEZ GONZALEZ, J. *Laminar photobioreactor for the production of microalgae*. US20130115688A1. Zapísané 09.05.2013.

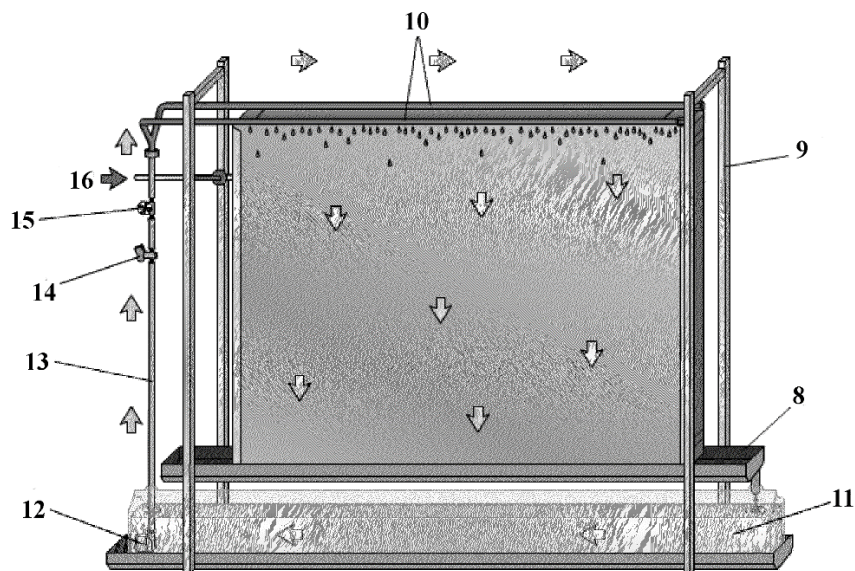
Patent sa týka modulárneho fotobioreaktora navrhnutého pre zjednodušenie absorbovania CO₂ mikroriasami. Absorpcia je založená na kontinuálnej recirkulácii média s riasami cez textilné pláty. CO₂ je pritom dovedené priamo do komory reaktora.

Navrhovaný reaktor je špecificky určený pre absorbovanie emisných plynov s vysokým obsahom CO₂. Telo každého modulu sa skladá z obdĺžnikového rámu (1), na ktorého oboch stranách je umiestnená tkanina, pozri Obr. 23. Vnútri rámu sa nachádza porézna trúbka (2), pripojená zvonku cez ventil (3) a prichytená o plastové podpery (4). Rám je spredu a zozadu uzatvorený rámom z ľahkej sieťky (5) podobnej sieťke proti hmyzu. Sieťky na oboch stranách nechávajú vzduchovú komoru vymedzenú vnútornou stranou rámu. Sieťka musí mať dostatočne malé oká, aby povrchové napätie média spôsobilo pokrytie sieťky kvapalinou, a vytvorilo tak súvislú vrstvu média s riasami. Pláty tkaniny (6) môžu byť na sieťkách a keď sa namočia, prilnú na sieťku, kryjúc tak obe strany rámu. Tkanina je k rámu upevnená tvarovanými lištami (7). Takto môžu byť použité rôzne typy tkaniny s rôznymi príľnavosťami jednotlivých druhov mikrorias. Vhodnými materiálmi na výrobu sieťky a tkaniny sú syntetické látky ako napríklad PVC, polystyrén, či polypropylén. V prípade neželaného odparovania média je možné tkaninu na vonkajšej strane prekryť transparentným plastovým materiálom. [14]



Obr. 23 – Prehľad jednotlivých vrstiev a komponentov fotobioreaktora. [14]

Zostava z Obr. 23 je umiestnená do podpornej konštrukcie (Obr. 24), nad kanálik (8) o niečo väčšej šírky ako je samotný rám. Boky panela sú uchytané na bokoch (9) konštrukcie. Vo vrchnej časti je po dĺžke rámu na každej strane vedená perforovaná trúbka (10), z ktorej tečie médium obsahujúce mikroriasy, tvoriac tak kontinuálnu vrstvu. Médium s riasami tak steká a zachytené je v kolektore (8), odkiaľ ďalej vteká do nádrže (11). Z tej je pomocou čerpadla (12) prečerpané cez trúbku (13), späť do vrchnej časti systému. Prietok je regulovaný ventilom (14) a monitorovaný prietokomerom (15).

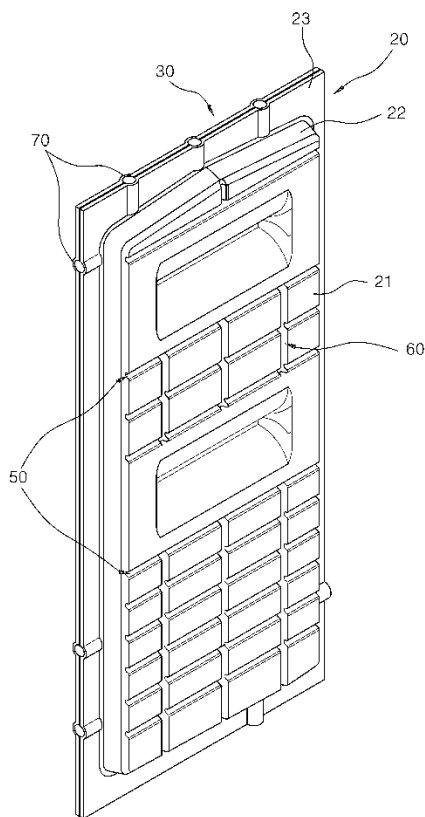


Obr. 24 – Znázornenie obehu média s mikroriasami systémom. [14]

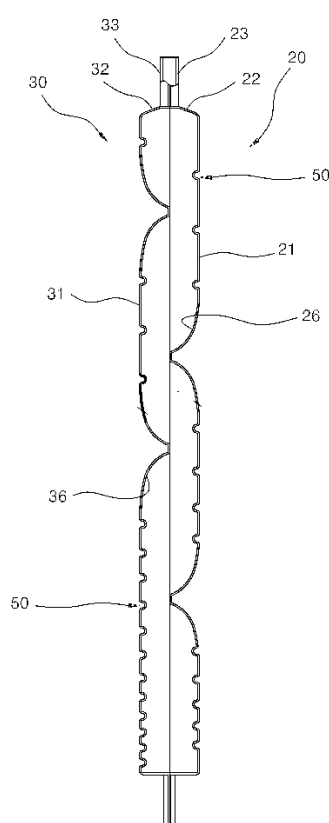
Zmes vzduchu a CO₂ je do systému zvonku privedená systémom trubiek (16) až do perforovanej hadice (2) vedenej vnútom reaktora. Prenos CO₂ do média sa deje prostredníctvom difúzie zvnútra komory cez steny, po ktorých médium s riasami steká. [14]

4) YU, Andong, Young-su AHN, Sanghwa CHUNG, Jongrak PARK, Jung PARK WOO a Jong KIM TAE. *Flat panel photobioreactor with high rigidity and multiple light reflector*. KR101207475B1. Udelené 03.12.2012.

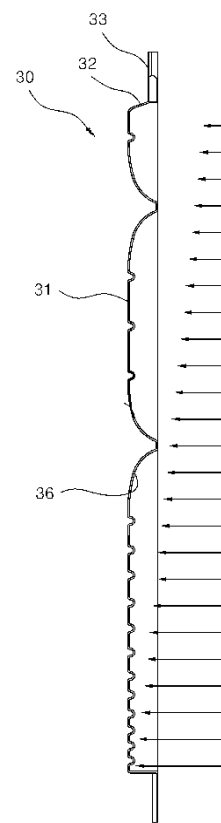
Návrh fotobioreaktora na Obr. 25 so spevnenou štruktúrou pre minimalizovanie deformácie vplyvom tlaku média, a upravenou vonkajšou stenou pre zvýšenie efektivity ožiarenia. Dosiiahnuté je to rozdelením steny reaktora (20, 30), vyrobenej z polykarbonátu, na viacero horizontálnych a vertikálnych sekcií. Steny sú navzájom spojené ultrazvukovým, alebo vibračným zvarom (23, 33) alebo/a skrutkami, či nitmi.



Obr. 25 – Štruktúra steny fotobioreaktora. [15]



Obr. 26 – Bočný rez fotobioreaktorom [15]



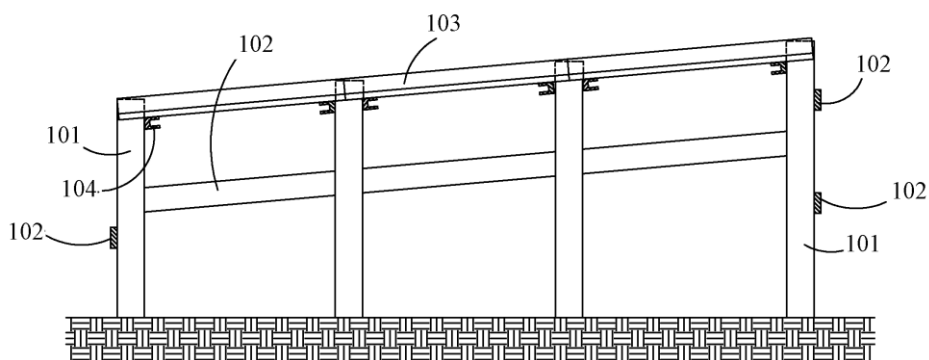
Obr. 27 – Rozloženie tlaku pôsobiaceho na stenu. [15]

Hydrostatický tlak pôsobiaci na steny komory sa so stúpajúcou hĺbkou kvapaliny zväčšuje lineárne (Obr. 27). Na vyváženie tohto javu sú do steny vbudované vertikálne podpery (50), ktorých hustota sa smerom k spodnej časti reaktora zväčšuje, pozri Obr. 27. Okrem toho sú

v stene zabudované aj vertikálne podpery (60) slúžiace na ďalšie vystuženie. Pripojovacími otvormi (70) vo vrchnej časti reaktora vstupuje do komory médium s riasami a vďaka rôznorodým tvarom (22, 26, 32, 36) vnútorných stien je médium dobre premiešavané a tiež striedavo vystavované svetelnému žiareniu. Konkávne tvary na vonkajšej strane fungujú podobne ako šošovky v patente č.2 a lámu dopadajúce svetlo, čoho výsledkom je lepšia svetelná expozícia rias. [15]

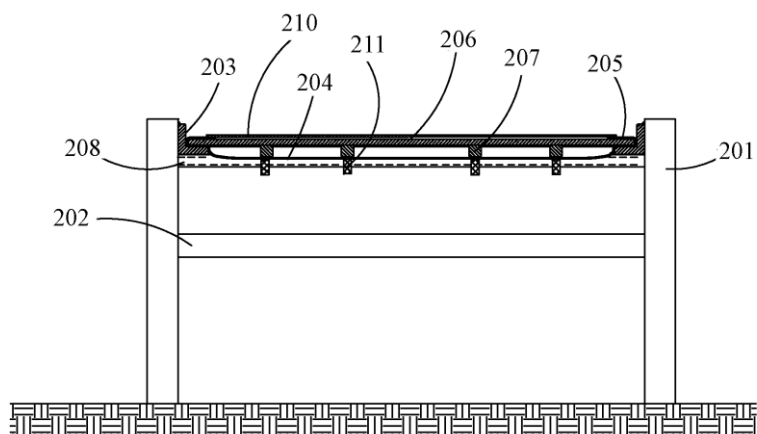
5) LEVIN, Alexander. *Photobioreactor*. USA. US20140093950A1. Udelené 24.03.2015. Zapísané 03.04.2014.

Patent predstavuje fotobioreaktor s kultivačnou komorou vo forme plytkého uzatvoreného žľabu osvetleného slnečným žiarením. Návrh sa snaží odpovedať na nedostatky otvorených nádrží na pestovanie biomasy, akými sú napríklad dostatočné presvetlenie celého objemu média, miešanie suspenzie, absorpcia CO₂ mikroriasami.

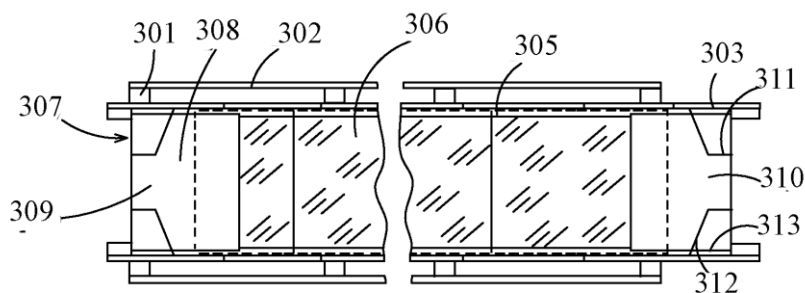


Obr. 28 – Bočný pohľad na konštrukciu fotobioreaktora: 101 – stĺpčky s 102 priečkami; 103 – podperné uhlové profily; 104 – priečne C- profily. [16]

Spodná sekcia žliabku je tvorená podlhovastou polymérovou fóliou (204) naklonenou pod uhlom, pričom fólia (na okrajoch prilepená) plní úlohu spodného krytu žliabku. Konštrukcia je tvorená dvomi paralelnými radmi stĺpikov (101, 201) a dvomi paralelnými radmi naklonených podporných uhlových profilov (103), upevnených na stĺpikoch, pozri Obr. 28. Stĺpiky a uholníky tvoria podpornú štruktúru, naklonenú ideálne o 0,1° - 2° voči horizontálnej rovine. Na takto postavenú konštrukciu sa umiestnia panely z tuhého, plochého transparentného materiálu (206) v kombinácii so spodnou flexibilnou fóliou. Transparentné panely, vyrobené zo skla či polymetylmetakrylátu (PMMA), sú pomocou lepidla zospodu osadené pozdĺžnymi výstužami (207) a tie sú zas spojené s pozdĺžne-priečnymi sekciami flexibilnej fólie (205). Flexibilná fólia sa ohne okolo tuhých panelov a uzatvorí tak komoru z vrchnej strany.



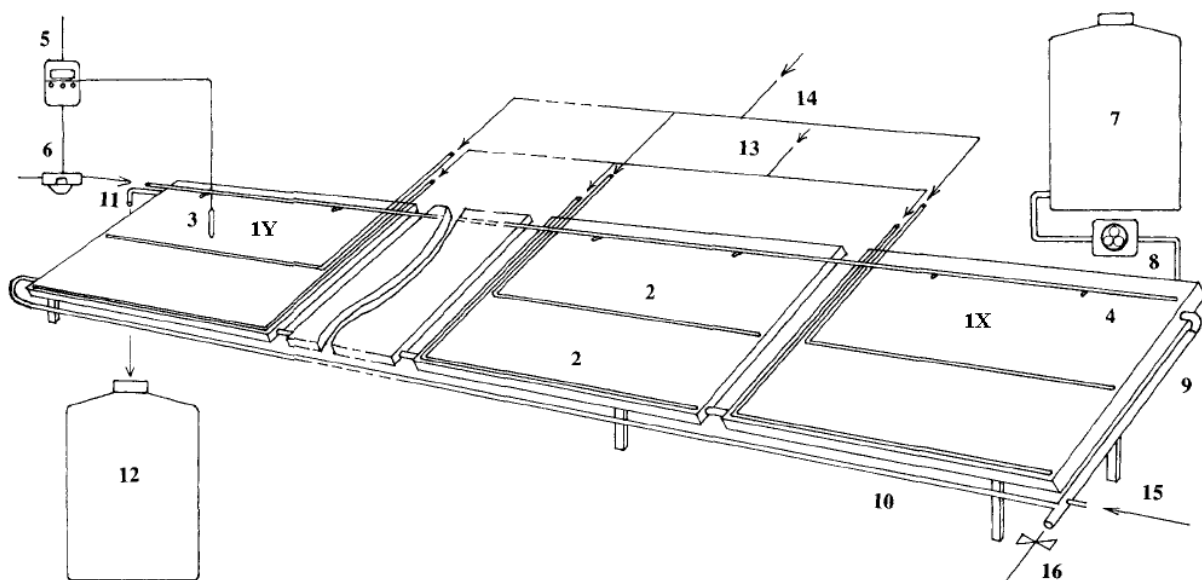
Obr. 29 – Prierez uzatvoreným žliabkom: 201 – stĺpiky; 202 – priečka; 203 – podperné uhlové profily; 204 – flexibilná fólia; 205 – pozdĺžne- priečne sekcie; 206 – transparentný panel; 207 – pozdĺžne výstuže; 208 – priečne C-profily. [16]



Obr. 30 – Vrchný pohľad na žliabok: 301 – stĺpiky; 302 – priečky; 303 – podperné uholníky; 305 – pozdĺžne- priečne sekcie; 306 – sklenené panely; 309(310) – vypúšťacia a napúšťacia nádoba; 311(312, 313) zvary. [16]

Na okrajoch konštrukcie sú umiestnené prívodové a odvodové nádoby. Tieto sú prepojené s nádobkami na vrchu a na spodku reaktora, ktoré slúžia na zásobovanie vzduchom obohateným o CO₂ a na následné odstraňovanie O₂ z komory. Nádoby tiež slúžia na zásobovanie komory médiom. [16]

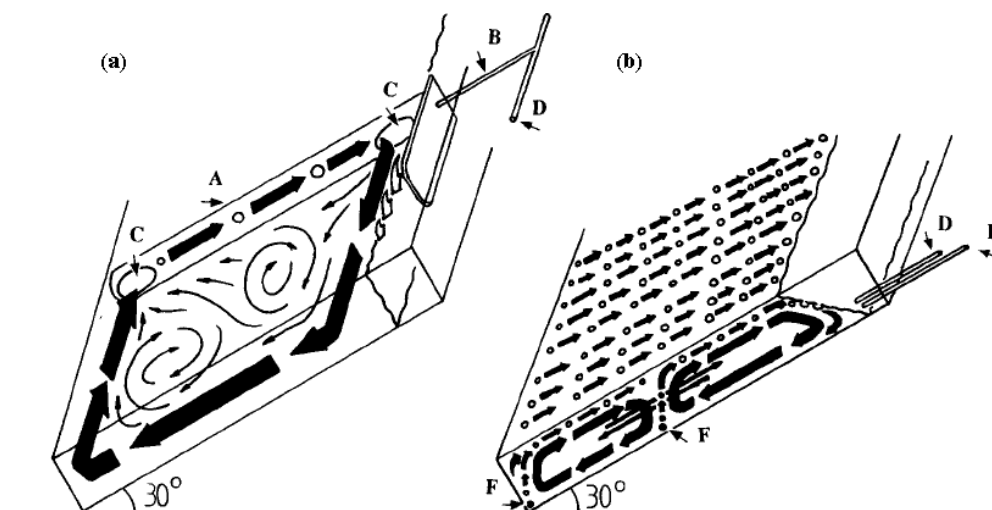
V odbornej literatúre [17] je opísaný podobný doskový naklonený fotobioreaktor skladajúci sa zo sklenených, 6 mm hrubých panelov o dĺžke 90 cm, výške 70 cm a vnútornej šírke 2,6 cm. Reaktory sú v zoskupení umiestnené smerom na juh a naklonené voči zemi o 30° v letnom režime a o 60° v režime zimnom. Sú kaskádovito prepojené PVC trúbkami s vonkajším priemerom 2 cm. Cirkulácia média v systéme je docielená použitím stlačeného vzduchu. Boli testované konfigurácie rôznych širok (svetelných dráh) – 1,3; 2,6; 5,2; a 10,4 cm – a rôznych objemov od 6 po 50 litrov. Vrch reaktora je krytý plastovou doskou.



Obr. 31 – Schematický diagram nakloneného doskového fotobioreaktora: 1X – úvodný reaktor; 1Y – posledný reaktor; 2 – perforované trúbky so stlačeným vzduchom; 3 – teplotný snímač; 4 – chladiace trúbky s rozprašovačmi; 5 – termostat; 6 – solenoidný ventil; 7 – rezervoár so suspenziou; 8 – čerpadlo; 9 – „airlift“ trubka; 10 – recyklačné vedenie prepájajúce prvú a poslednú jednotku; 11 – zberný vývod; 12 – zberný rezervoár; 13 – zásob stlačeného vzduchu; 14 – vedenie vzduchu obohateného o CO₂; 15 – vstup stlačeného vzduchu pre „airlift“ trubku; 16 – odber vzoriek. [17]

Boli otestované dva spôsoby miešania média. Ten prvý založený na systéme „airlift“ – päť transparentných oválnych PVC stĺpčiekov s otvoreným koncom, s vnútorným priemerom 2,4 cm, vertikálne umiestnených v reaktore. Prúd stlačeného vzduchu je privedený do stĺpčeka cez polypropylénový rozprašovač umiestnený v jeho spodnej časti. Cirkulácia suspenzie je docielená tým, že ju prúd vzduchu nadnáša cez dutý stĺpček smerom hore, nasávajúc suspenziu opätovne v dolnej časti (Obr. 32a).

Ďalším spôsobom bolo mixovanie vzduchovými bublinami – dve trubky, s vnútorným priemerom 0,5 cm, jedna na spodku a druhá v strede reaktora, vedené horizontálne pozdĺž komory reaktora a z nich vychádzajúce vzduchové bubliny. Vzduch vychádzajúci z dier o priemere 0,5 mm vytvára prúd nadnášajúci suspenziu smerom k povrchu, miešajúc tak celý objem. Na vrchu sa bubliny odpoja a sú z reaktora vyvedené, suspenzia sa po zadnej stene vracia smerom dolu (Obr. 32b).



Obr. 32 – Znárodzenie variantov miešania suspenzie vo fotobioreaktore so sklonom 30°: (a) „airlift“ miešanie; (b) miešanie vzduchovými bublinami. A – transparentný stĺpček, B – rozprašovacia trubka, C – otvory v stĺpiku pre vstup a výstup suspenzie, D – trubka dodávajúca zmes stlačeného vzduchu a CO₂, E – trubka dodávajúca stlačený vzduch, F – perforované trubky vypúšťajúce vzduchové bubliny. [17]

Zber biomasy sa deje pri pretekaní suspenzie cez zberný otvor, pozri O. Bol zavedený semikontinuálny zber – časť kultúry je odvedená a rovnaký objem čerstvého média je privedený do reaktora. Toto sa deje každý deň alebo raz za 3 dni. Nasledujúca rovnica bola použitá pri výpočte zbieraného média [17]:

$$V_z = \frac{(X_2 - X_1) V_c}{X_2} \quad (2.2)$$

kde V_z je zbieraný objem, V_c je celkový objem, oboje v litroch. X_2 a X_1 sú hustoty buniek ($g^{-1} L$), v 24-h intervaloch, kde X_1 je želaná hustota po zbere, za predpokladu, že $X_1 \leq X_2$. [17]

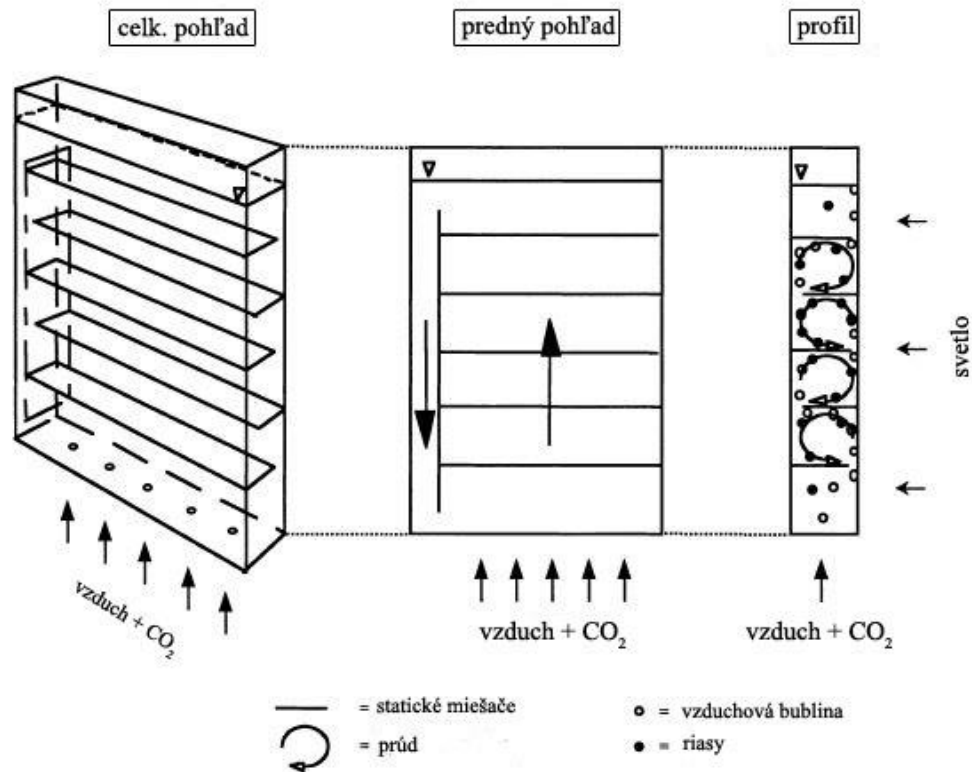
2.2.2 Rešerš aplikovaných doskových fotobioreaktorov

Fotobioreaktory z tuhých panelov

Konvenčné FPBR sa na jednu stranu jednoducho čistia, majú dobrú transparentnosť, na stranu druhú majú nedostatok v podobe kontroly prúdenia média, či udržania pomeru ceny/efektivity na prijateľných hodnotách (problém spôsobený vyššími cenami priehľadných materiálov). Jedným z pokusov o riešenie tohto problému bol fotobioreaktor z 1.6 cm hrubých plátov komôrkového plexiskla, ktorého priepustnosť bola asi 95 % viditeľnej časti svetelného spektra. Tento model mal pomer povrch/objem 80 m²/m³ a 12.5 mm hrubú vrstvu kultúry, miešaný bol pomocou čerpadla. Produkcia biomasy v čistom bola 16 g/m²d s koncentráciou 28 g/m² za použitia 5 m² panelu vo vonkajšom prostredí. Výhodami boli relatívne nenákladná

výroba, vysoký pomer povrchu/objemu, flexibilita a dobré premiešavanie a výmena plynov. Nevýhodami zasa kontrola teploty a svetelná inhibícia. [10]

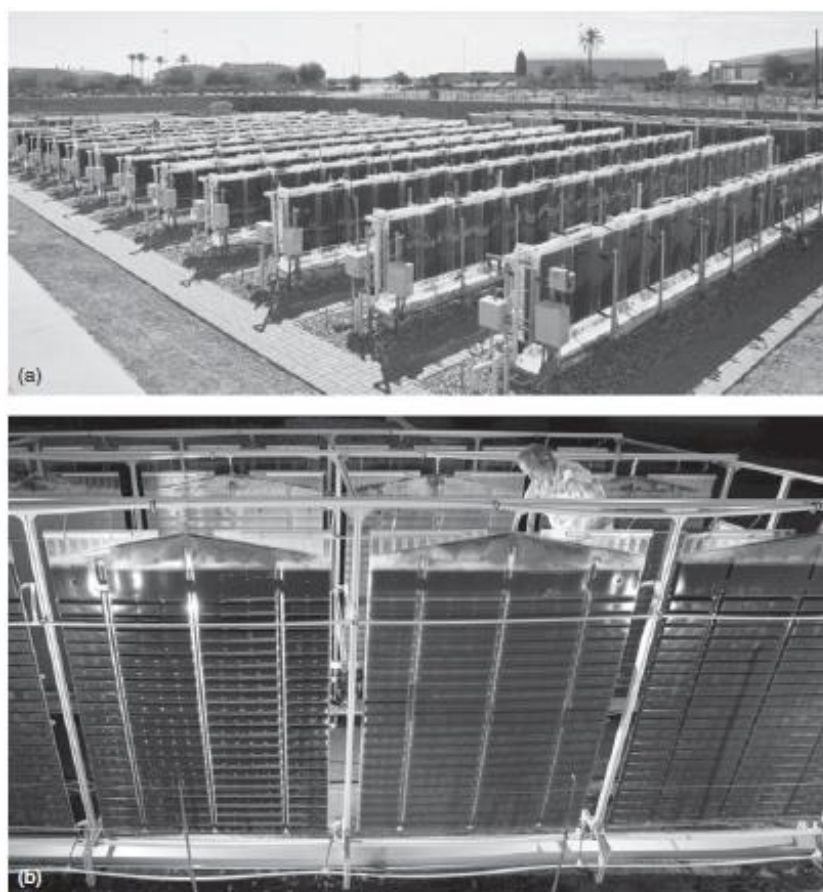
V kapitole 2.2.1 opísaný patent č.1, ktorý umožňuje adaptovanie rozličných hĺbok prieniku svetla, nastavenie konfigurácie (vertikálnej, naklonenej), a tiež rôzne geometrické konfigurácie, bol testovaný na Arizonskej štátnej univerzite. Reaktor bol rozdelený na niekoľko komôr čiastočne oddelených priehradkami s možnosťou pripojenia viacerých jednotiek k sebe tvoriac tak väčšie zoskupenia (Obr. 34a). Dodatočné, až 37 % zvýšenie produktivity v porovnaní s jednodukomorovým reaktorom priniesol variant s dvomi separátnymi oddeleniami, pričom v každom bol pestovaný iný druh rias. Na strane reaktora s vyššou intenzitou svetelného žiarenia boli zavedené riasy prispôsobené práve takýmto svetelným podmienkam. Na druhej strane reaktora boli pestované riasy, ktorým vyhovovali podmienky s menšou svetelnou koncentráciou. [7]



Obr. 33 – „Airlift“ fotobioreaktor s horizontálnymi priečkami [18]

V priemyselnom prostredí bol vyvinutý FPBR firmou Subitec GmbH. Tento reaktor je v podstate tuhý plastový panel rozdelený na veľké stúpacie zóny, do ktorých je privedený stlačený vzduch a menšie spádové zóny. Stúpacie zóny sú ďalej členené navzájom prepojenými horizontálnymi komorami. Stúpajúce vzduchové bubliny vytvárajú víry, ktoré pohybujú

bunkami z a do presvetlených vrstiev. Nová verzia reaktora (Obr. 34(b)) je vyrobená z hlboko ťahaných PVC foriem zvarovaných navzájom, tvoriac 2.7 m vysoký a 1.75 m dlhý reaktor, ktorý obsahuje 180 L kultúry. Cena reaktora je asi 1 € za L, čo sa rovná približne 40 € za m².



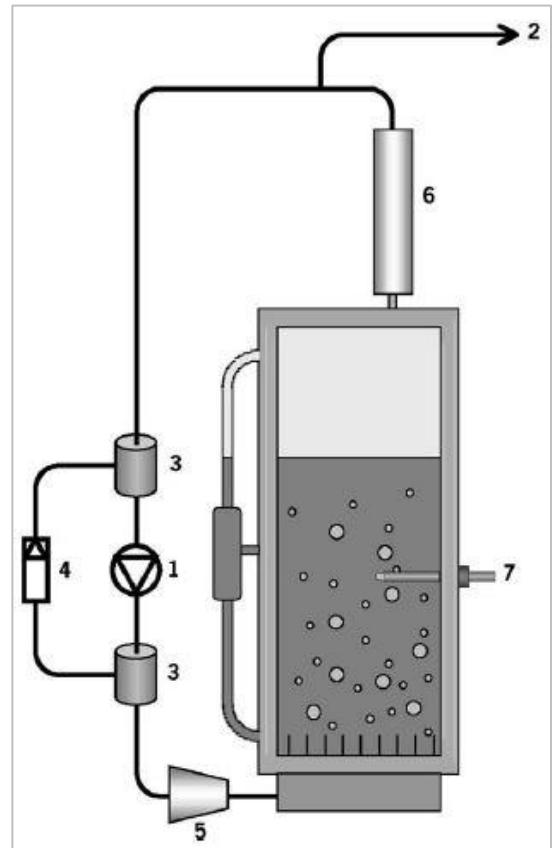
Obr. 34 – Doskové fotobioreaktory. (a) Fotobioreaktory v areáli Arizonskej štátnej univerzity;(b) Fotobioreaktory od firmy Subitec GmbH (Nemecko) [7]

Ďalší inovatívny vertikálny PBR, nazvaný „Hanging Gardens“ (Obr. 35), bol vyvinutý a patentovaný firmou Ecoduna OG (Hamburg, Nemecko). Systém sa skladá zo série nahusto rozložených, 6 m vysokých tuhých vertikálnych panelov, zavesených v rámci pohyblivej štruktúry, ktorá zoskupeniu panelov umožňuje sledovať pohyb slnka. Panely sú interne rozdelené do navzájom prepojených kanálov prostredníctvom vertikálnych stien skrátenejších striedavo na spodku a na vrchu, pre umožnenie prúdenia suspenzie. CO₂ vstrekané na spodku reaktora slúži na premiešanie média, odstránenie O₂ generovaného fotosyntetickým procesom a ako zdroj uhlíka. Čerpadlá sú na miešanie používané minimálne. Fotobioreaktor poskytuje osvetlenú plochu 32 m² a objem kultúry okolo 440 L na každom metri štvorcovom pôdorysu. Výhodami sú redukcia nákladov na miešanie, veľká osvetlená plocha a efektívne využitie zastavanej plochy. Natáčaním v závislosti od smeru dopadu slnečného žiarenia sa predchádza

vzájomnému tieneniu. Nevýhodami systému sú potreba veľkého množstva použitého materiálu na reaktor samotný ako aj na podporné štruktúry a náklady s tým spojené. [7]



Obr. 35 – Fotobioreaktor „Hanging Gardens“ [19]



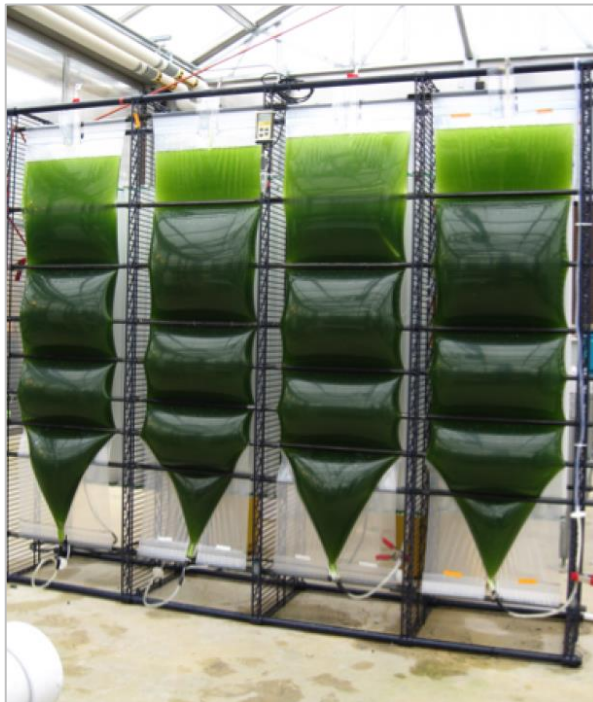
Obr. 36 – Schéma fotobioreaktora: (1) membránové čerpadlo; (2) plynový vak na zber vyprodukovaného plynu; (3) dve 1 L tlakové nádoby; (4) tlakový ventil; (5) hmotnostné prietokomery; (6) kondenzátor; (7) pH meter [20]

Na Obr. 36 je reaktor skladajúci sa z troch polykarbonátových panelov a rámu z nerezovej ocele. Má dve priehradky uložené za sebou. Tá predná obsahuje kultúru baktérií (3 cm hrubú) s objemom 2.4 L. Cez zadnú časť (2 cm hrubú) prúdi voda cez nádobu, kde je teplota nastavená na 30°C. Na jednej strane reaktora sa nachádzajú dve 500 W volfrám-halogenové lampy uložené nad sebou a posunuté 75 cm od reaktora. Priemerná intenzita svetla na povrchu reaktora bola asi 175 W m^{-2} . Membránové čerpadlo sa stará o prúdenie plynu jeho vstrekaním pomocou injekčných ihliel na spodku reaktora. Vyprodukovaný plyn je zbieraný do plynového vaku. Dve 1 L tlakové nádoby zabraňujú kolísaniu tlaku v recirkulačnom systéme a kondenzátor zabraňuje vniknutiu vodnej pary do systému. [20]

Fotobioreaktory z flexibilných fólií

Fóliové fotobioreaktory sú považované za nízko nákladové, jednoduché na prevádzku a málo znečisťujúce systémy pre masovú produkciu biomasy z rias. Niektoré z dizajnov ukazujú potenciál pre priemyselné použitie.

Výskumný tím z Arizonskej univerzity vyvinul fotobioreaktor s názvom „Accordion“. Systém, tvorený tenkou polyetylénovou fóliou, sa skladá zo série vertikálnych, sínusovo zahnutých puzdier nasadených na kovovom ráme (Obr. 37). Suspenzia s riasami je zhora čerpaná do systému a prúdi z jednej sekcie do druhej. Testované a následne optimalizované boli jednotky s objemom 50-70 L. Výhodami konceptu sú veľká osvetlená plocha, veľký pomer plochy k objemu a možnosť zmeniť uhol ohybu vakov a dosiahnuť tak kontrolu rýchlosti prietoku a tiež kontrolovať uhol dopadu svetla na povrch reaktora.



Obr. 37 - Fotobioreaktor vyvinutý na Arizonskej univerzite nazvaný "Accordion" [21]

Skupina výskumníkov z Florencie sa zaoberala vývinom „rozložiteľného panelu“, a tak navrhla a dala si patentovať reaktor s názvom „Green Wall Panel“ (GWP). Je to plochý reaktor obsahujúci komoru s kultúrou tvorenú 0.3 mm tenkou flexibilnou polyetylénovou fóliou s nízkou hustotou. Komora bola uzatvorená v pevnom ráme. V prípade prvej generácie GWP (GWP-I) bol vak z fólie podopretý obdĺžnikovou oceľovou sieťou a vertikálnymi podperami. Typický GWP-I je 1 m vysoký, 4 cm hrubý a 20 m dlhý a obsahuje približne 800 L kultúry

(Obr. 38(a)). Moduly sú obecné umiestnené vertikálne a smerom na juh v rovnobežných radoch vzdialených asi 1 m, čo v Toskánku po väčšinu roka umožňuje predísť vzájomnému tieneniu. Suspenzia je miešaná stlačeným vzduchom privedeným perforovanou plastovou trúbkou na spodku reaktora. CO₂ je do kultúry uvedený cez plynový difúzor umiestnený v neprevzdušnenej zóne. Kontrolná jednotka poskytuje reguláciu teploty automatickým spínaním tepelných výmenníkov či kropením povrchu reaktora vodou. GWP-I bolo použité na pestovanie viacerých druhov morských rias. Vo väčších rozmeroch je v prevádzke na viacerých miestach v Taliansku a v Portugalsku. Archimede Ricerche Srl (Imperia, Taliansko) je spoločnosť, ktorá prišla s prvou talianskou priemyselnou prevádzkou na vysoko kvalitnú biomasu z rias. Používa sa v kozmetike, akvakultúre a vo farmaceutickom sektore. Výroba sa skladá z modulov GWP-I umiestnených v skleníku, zaberajúc 1000 m². Každý modul sa skladá z desiatich 1 m vysokých, 12.5 m dlhých a 4 cm hrubých panelov umiestnených 1.5 m od seba (Obr. 38b). Pestujú sa tu 4 druhy rias a ročná produkcia je 2000 kg suchej váhy biomasy. [7]

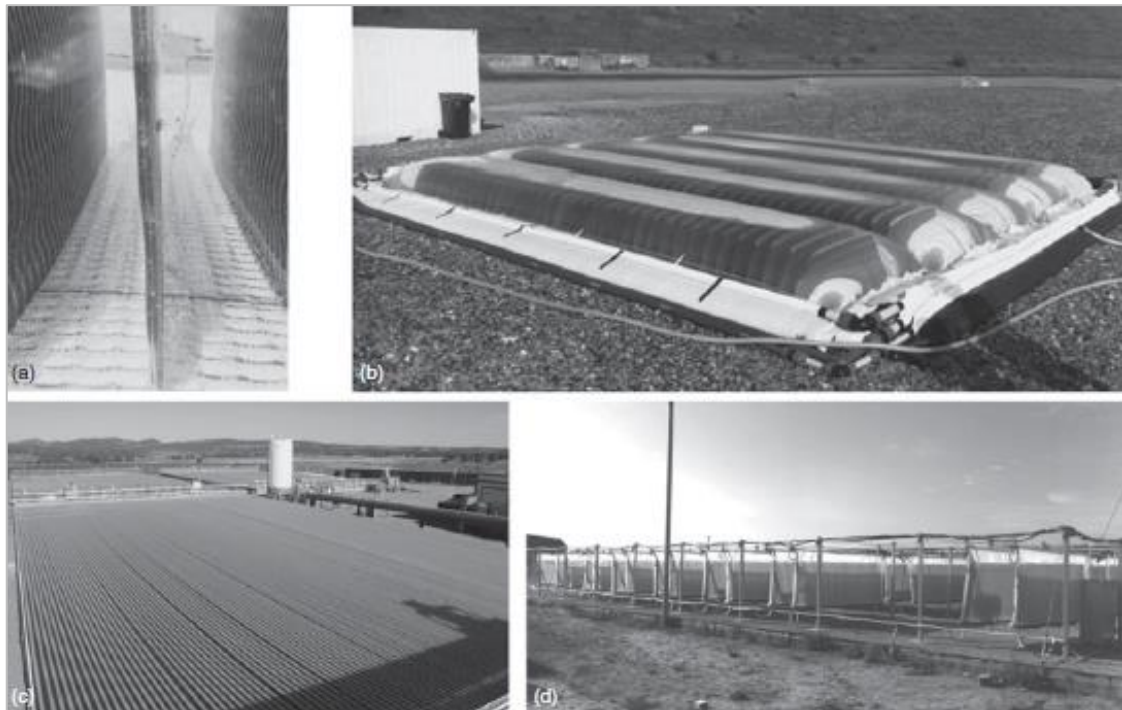


Obr. 38 -Flexibilné panely. (a) 10 m dlhý GWP prvej generácie; (b) moduly GWP-I (1000 m²) v prevádzke v Taliansku; (c) 12 m dlhý GWP druhej generácie; (d) GWP-II v prevádzke pri elektrárni Empresa Electrica del Norte Grande SA (Čile) [7]

Dizajn GWP prešiel modifikáciou za účelom zníženia jeho ceny. Nový návrh (GWP-II) sa zbavil podporných kliebok a vaky sú umiestnené v jednoduchšej konštrukcii so základňou a niekoľkými vertikálnymi priečkami spojenými s ňou (Obr. 38c). Vo vonkajšom prostredí bol

testovaný prototyp 0.7 m vysoký, 4 cm hrubý a 12 m dlhý s najlepšou dosiahnutou produktivitou až $0.26 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ cez slnečné dni a s koncentráciou buniek pri zbere do 1.5 g L^{-1} cez zimu. GWP-II reaktory na sekvestráciu CO_2 a produkciu biopalív sú v prevádzke v elektrárni spoločnosti Empresa Electrica del Norte Grande SA (Antofagasta, Čile) (Obr. 38d). Odstránenie kliebok a zníženie výšky reaktora z 1 na 0.7 m viedli k možnosti použitia ľahšieho kovového rámu a tým pádom k redukcii ceny reaktora z 50 € na asi 25 € m^{-2} . Ďalšie chystané úpravy ako rozdelenie komory na dve či viacero sekcií by mali podľa očakávania znížiť cenu reaktora na 5 € m^{-2} . Hlavnými výhodami dizajnu GWP je jeho nízka cena a možnosť jeho zväčšenia na priemyselné použitie. Hlavnú neistotu predstavujú vysoké energetické nároky ako na miešanie, tak aj na chladenie, ktoré by mohli presiahnuť množstvo energie obsiahnutej vo vyprodukovanej biomase. [7]

Firma Proviron Holding NV (Belgicko) vyvinula PBR naplnený vodou (nazvaný ProviAPT), ktorý zahŕňa sériu nízkych tenkých panelov. Inovatívnosť dizajnu spočíva v možnosti sériovej výroby plastového vaku, vrátane všetkých panelov a spojení. Pre jeho rozloženie stačí vak rozprestrieť a naplniť vodou. Vďaka tlaku vody zvonku, ktorý vyrovnáva vnútorný tlak suspenzie, sú panely samo-podperné a zaujímajú zvislú pozíciu bez potreby podpornej štruktúry. Miešanie suspenznej kultúry a regulácia pH sú docielené prevzdušňovaním vzduchom bohatým na CO_2 . Každý panel je vnútorne rozdelený na niekoľko navzájom prepojených oddelení. Tento vzorec znižuje rýchlosť stúpania bublínok a zaručuje tak efektívne využitie prúdu vzduchu. Medzi výhody systému patrí krátka optická dráha a veľký objem (500 L m^{-2}) vody obklopujúcej panely, čo poskytuje tlmenie teploty bez potreby iného termoregulačného systému (Obr. 39a). Kvôli použitiu veľmi tenkých stien reaktora je optimálna produkcia dosiahnutá pri vysokej hustote buniek ($5\text{-}10 \text{ g L}^{-1}$). Na jeden meter štvorcový je použitých 3 kg plastovej fólie, výsledná cena reaktora pritom nepresahuje 10 € m^{-2} . Spotrebovaná energia je asi 2 W m^{-2} , väčšinu z toho spotrebuje prevzdušňovanie. Hlavnými nevýhodami sú komplikovaný prístup ku kultúre a risk pretrhnutia vaku. [7]



Obr. 39 – Flexibilné fotobioreaktory. (a) Detail reaktora ProviAPT vyvinutého belgickou firmou Proviron Holding NV; (b) ProviAPT v rámci funkčnej prevádzky v Antverpách (Belgicko); (c) demonštratívna prevádzka firmy Solix Biosystems v južnom Colorade (USA);(d) systém Phytobag vyvinutý firmou Phytosolutions GmbH (Nemecko) blízko elektrárne v Brémach (Nemecko) [7]

Spoločnosť Solix Biofuels vyvinula nízko nákladový reaktor „Algae Growth System“ (AGS). Dizajn G3 je posledný z generácie AGS a je zložený zo série vertikálnych panelov zo zvarenej plastovej fólie ponorených v plytkej nádobke s vodou. Toto umožňuje mechanickú podporu ako aj kontrolu teploty. Vzduch obohatený o CO_2 je vstrekaný perforovanými trúbkami a pomocou neho je v reaktore kontrolovaná hodnota pH, odvádzaný rozpustený kyslík a zaistené miešanie suspenzie. Po čase sa firma premenovala na Solix BioSystems a predstavila dva nové kultivačné systémy – Lumian™ AGS4000 a Lumian™ AGS260. Prvý spomenutý je zložený z termálnej vane obsahujúcej dvadsať 200 L panelov a k tomu dva 14 L a šesť 28 L panelov na tvorbu očkovacej látky (Obr. 40). Systém AGS4000 je vybavený kompaktným príviesom na prípravu média, zber a čistenie. Jeho základná cena je okolo 300 000 amerických dolárov. Objemová produktivita pri pestovaní *Nannochloropsis* sa pohybovala medzi 0.2 a 0.3 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$, čo by odpovedalo 10-14 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Hrubá koncentrácia pri zbere bola asi 3 g L^{-1} . Menší model Lumian AGS260 je vhodný pre predbežné ohodnotenie vonkajšej kultivácie rias. Cena modelu bez chladenia je asi 50 000 amerických dolárov. Skúšobná prevádzka systému (Obr. 39c) s rozlohou 0.3 ha bola postavená na juhu Colorada (USA). Použitá bola odpadová voda z produkcie metánu z uhoľného podlažia a CO_2 z elektrárne. Z biomasy je extrahovaný olej

a zvyšok je použitý v potravinárskom priemysle. Solix tvrdí, že sa im podarilo dosiahnuť výťažok lipidov 29 000 L ha⁻¹ rok⁻¹. [22]



Obr. 40- Lumian AGS4000 od Solix BioSystems [22]

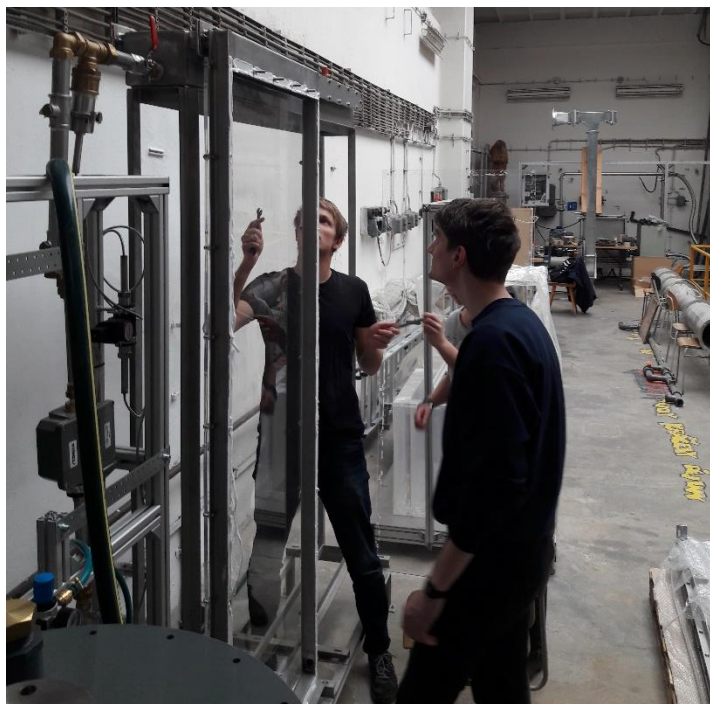
Reaktor nazvaný „Phytobag“ použitý firmou Phytosolutions GmbH Ltd (Brémy, Nemecko) je vyrobený z elastickej polyetylénovej fólie a je zavesený na ráme. Miešaný je prostredníctvom prúdu vzduchu. Komora obsahujúca médium a riasy je vlastne plastovým fóliovým vakom uzatvoreným na každej strane a rozdeleným na viacero vertikálnych komôr. Cez podporné štruktúry na vrchu môžu byť reaktory zavesené na rámy a umiestnené blízko seba do zvislých regálov, tvoriac tak súbežné rady. Od januára 2010 bola pri Brémach (Nemecko) v prevádzke vonkajšia produkcia o rozlohe 500 m² s objemom reaktorov 25 m³ (Obr. 39d). Na reguláciu teploty bolo použité zvyškové teplo z neďalekej elektrárne a ako zdroj CO₂ zas emisné plyny. Odhady hovorili, že pri niekoľko hektárovej rozlohe by mala cena za meter štvorcový byť okolo 15 € a ročná produkcia 80 až 120 t ha⁻¹ a to vďaka mixotrofnému rastu (zdroj uhlíka by bola odpadová voda). Nízka cena a dobrá možnosť použitia v priemyselnom rozsahu sú hlavnými výhodami systému. [7]

3 Experimentálna a výpočtová časť

V laboratóriu Ústavu procesnej a spracovateľskej techniky na FS ČVUT (Fakulta strojná – České vysoké učení technické) sa nachádza doskový fotobioreaktor navrhnutý v rámci diplomových prác študentov na ústave. Praktická časť tejto bakalárskej práce je cieľaná na meranie a výpočet tlakových strát medzi vstupom a výstupom média, meraná práve na spomenutom zariadení. Keďže na prototypu fotobioreaktora sa vyskytli problémy s tesnením, bol zostavený reaktor nový. V ďalšej časti práce je popísaný a zobrazený proces zostavenia fotobioreaktora a následne je taktiež popísané a vyhodnotené samotné meranie tlakových strát.

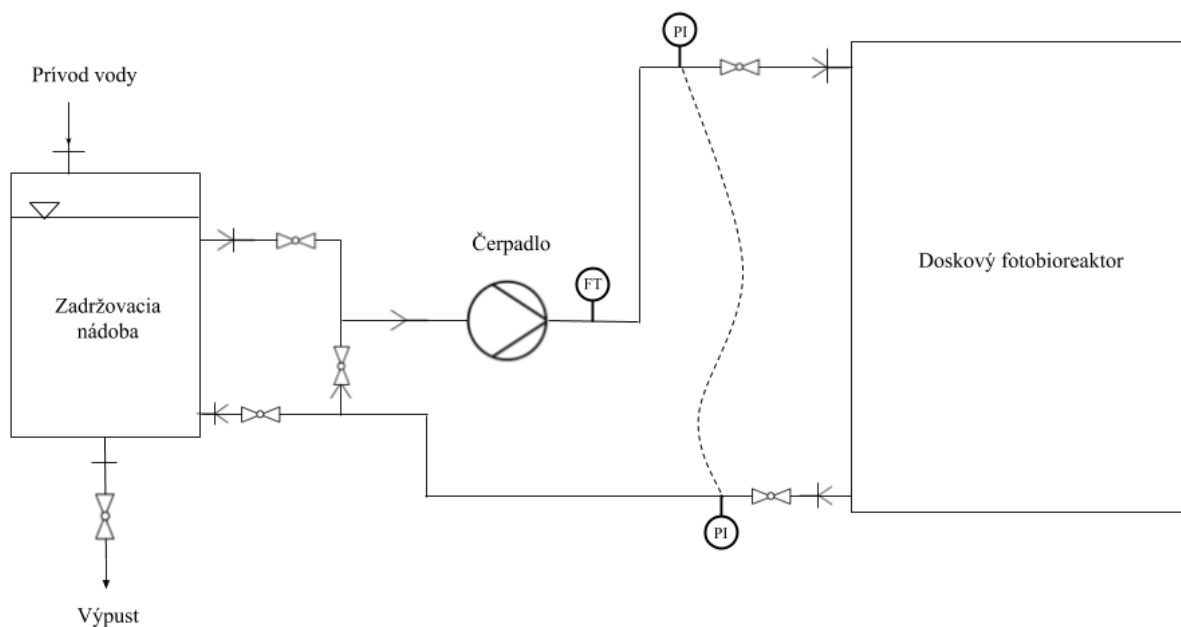
3.1 Zostavenie fotobioreaktora

Na úvod bol rozmontovaný predchádzajúci poškodený fotobioreaktor (Obr. 41). Rám, na ktorom bol starý reaktor osadený bol použitý aj pre novú verziu. Nový reaktor bol rozbalený, osadený potrebnými armatúrami (Obr. 43) a pripevnený k rámu. Po zapojení rozvádzacieho systému bolo potrebné overiť správnosť zapojenia a prevádzku celého systému. Do zadržiavacej nádoby bola privedená čistá voda, ktorou bol fotobioreaktor napustený (Obr. 44). Sledovaná bola hlavne reakcia polypropylénových panelov na hydrostatický tlak a tiež kritické oblasti okolo otvorov na skrutky, umiestnené po obvode panelov.



Obr. 41 – Demontáž pôvodného fotobioreaktora.

Obeh média v systéme zabezpečovalo samonasávacie čerpadlo Calpeda NGXM 6/22 s výkonom 1.5 kW. V rámci systému bol tiež zakomponovaný snímač prietoku Omega FLR6315D s rozsahom $6,66 \times 10^{-5} - 93,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a presnosťou $\pm 2 \%$ plného rozsahu. Pred vstupným a výstupným otvorom média boli inštalované snímače tlaku prepojené diferenčným snímačom DMD331 s rozsahom 0 – 100 kPa a presnosťou $\pm 0,5 \%$ nameranej hodnoty. Toto príslušenstvo bolo použité pri meraní tlakových strát, pozri podkapitolu 3.3.



Obr. 42 – Diagram zapojenia laboratórneho fotobioreaktora.



Obr. 43 – Osádzanie armatúr.

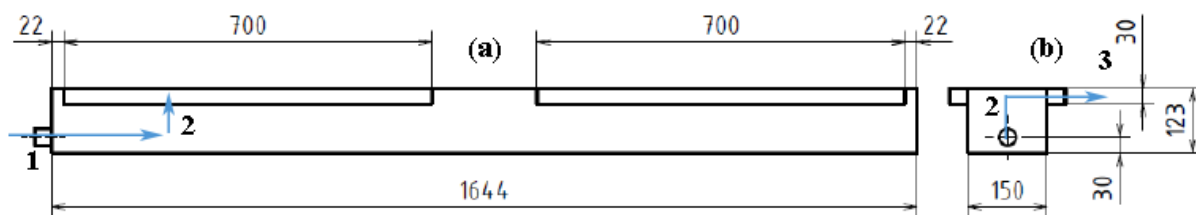


Obr. 44 – Napúšťanie reaktora.



Obr. 45 – Nový systém po inštalácii; v ľavej časti retenčná nádoba, vpravo nový fotobioreaktor.

3.2 Analytický výpočet tlakových strát



Obr. 46 – Rozvádzač média. [23]

Na Obr. 46 je znázornený smer prúdu čerpaného média v prvotnej sekcii sledovaného úseku. Zo schémy je jasné, že prúd najskôr prechádza cez vstupné hrdlo s priemerom 32 mm, rozšírením (1), potom dvakrát zmení smer (2) a vchádza do zúženej časti (3). Vo výpočte sa pre zjednodušenie uvažuje iba jedna zmena smeru – Obr. 46 b. Viaceré parametre boli pri výpočte považované za :

| Veličina | Hodnota |
|--|----------------------|
| Hustota vody pri teplote 25°C - ρ [kg m ⁻³] | 997 |
| Dynamická viskozita vody – μ [Pa s] | 8,9x10 ⁻⁴ |
| Absolútna drsnosť ocele – k [mm] | 0,1 |
| Absolútna drsnosť PMMA – k [mm] | 0,01 |

Tab. 1 – Veličiny vo výpočte použité ako konštanty.

1) Náhle rozšírenie: kruhový priemer 32 mm → rozvádzacia nádoba

Objemový prietok vo vstupnej trubke uvažujeme 8,82x10⁻⁴ m³ s⁻¹. Z rovnice kontinuity vyplýva:

$$u_1 = \frac{\dot{V}}{S_1} = \frac{8,82 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,016^2} = 1,097 \text{ m s}^{-1} \quad (3.11)$$

Súčiniteľ miestnych strát ζ sa počíta podľa vzorca 3.12, vo výpočte je však použitá empirická hodnota rovná jednej (za podmienok nášho prípadu $S_2 \gg S_1$, kde S_2 je prierez časti do ktorej kvapalina vteká, S_1 prierez časti z ktorej vyteká):

$$\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (3.12)$$

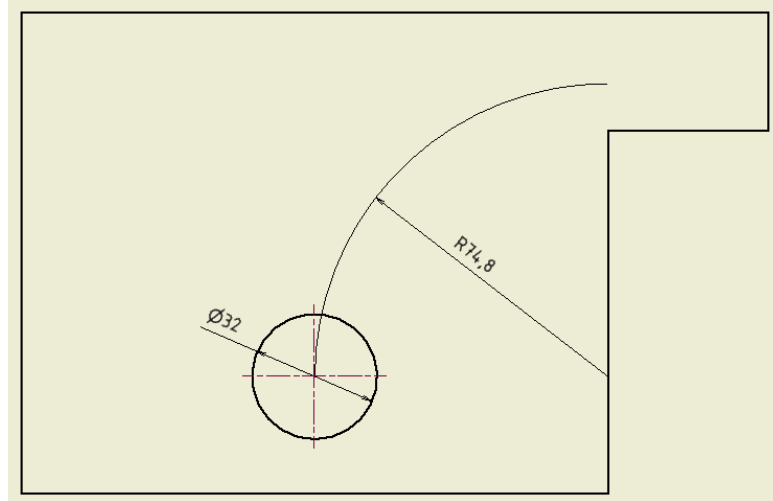
ďalej pre mernú stratovú energiu:

$$e_{z1} = \zeta_1 \frac{u_1^2}{2} = 1 * \frac{1,097^2}{2} = 0,602 \quad (3.13)$$

tlaková strata na prvom úseku sa teda rovná:

$$\Delta p_1 = e_{z1} * \rho = 0,602 * 997 = 599,9 \text{ Pa} \quad (3.13)$$

2) Zmena smeru prúdenia (Obr. 47)



Obr. 47 –Zmena smeru prúdenia v rozvádzacej nádobe.

Pre hydraulický priemer štvorcového prierezu platí:

$$d_2 = \frac{4 * S_2}{O_2} = \frac{4 * 0,15 * 0,744}{2 * (0,1 + * 0,744)} = 0,25 \text{ m} \quad (3.14)$$

kde O je zmáčaný obvod (uvažujeme prierez plne naplnený vodou) ďalej rovnako ako v prípade 1):

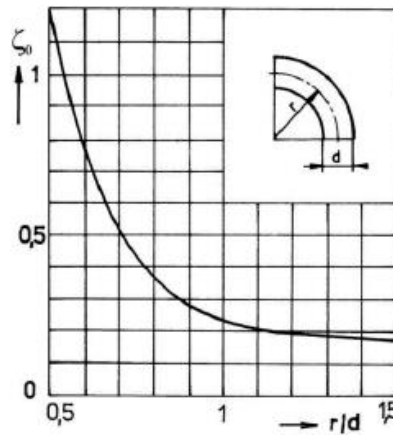
$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{8,82 * 10^{-4}}{0,15 * 0,744} = 7,9 * 10^{-3} \text{ m s}^{-1} \quad (3.15)$$

koeficient miestnych strát (pozri Obr. 48) pre $r = 0,075 \text{ m}$, $d = d_2 = 0,25 \text{ m}$ je $\zeta = 1,4$. Z toho výpočet mernej stratovej energie:

$$e_{z2} = \zeta \frac{u_2^2}{2} = 1,4 * \frac{(7,9 * 10^{-3})^2}{2} = 4,37 * 10^{-5} \quad (3.16)$$

následne tlaková strata na druhom úseku:

$$\Delta p_2 = e_{z2} * \rho = 4,37 * 10^{-5} * 997 = 0,0435 \text{ Pa} \quad (3.17)$$



Obr. 48 – Krivka závislosti súčiniteľa miestnych strát na geometrii kolena. [23]

3) Zúženie na výstupné hrdlo rozvážzacej nádoby

$$\zeta_3 = 0,5 * \left(1 - \frac{S_4}{S_3}\right) = 0,5 * \left(1 - \frac{0,7*0,03}{0,744*0,093}\right) = 0,339 \quad (3.18)$$

$$u_3 = \frac{\dot{V}}{S_4} = \frac{8,82*10^{-4}}{0,03*0,7} = 0,042 \text{ m s}^{-1} \quad (3.19)$$

$$e_{z3} = \zeta_3 \frac{u_3^2}{2} = 0,339 * \frac{0,042^2}{2} = 2,99 * 10^{-4} \quad (3.20)$$

$$\Delta p_3 = e_{z3} * \rho = 2,99 * 10^{-4} * 997 = 0,298 \text{ Pa} \quad (3.21)$$

4) Vstupné hrdlo do fotobioreaktora, pozri Obr. 49:

Výpočet rýchlosti

$$u_4 = \frac{\dot{V}}{S_4} = \frac{8,82*10^{-4}}{0,03*0,7} = 0,042 \text{ m s}^{-1} \quad (3.22)$$

d'alej je potrebné určiť režim prúdenia pomocou Reynoldsovho čísla – na to je potrebný hydraulický priemer úseku 4, ako v rovnici 3.14:

$$d_4 = \frac{4*S_4}{O_4} = \frac{4*0,03*0,7}{2*(0,03+0,7)} = 0,058 \text{ m} \quad (3.23)$$

a samotné Reynoldsovo číslo:

$$Re_4 = \frac{u_4*\rho*d_4}{\mu} = \frac{0,042*997*0,058}{8,9*10^{-4}} = 2732 \quad (3.24)$$

z čoho vyplýva, že sa jedná o prechodný režim prúdenia. Pre zjednodušenie výpočtu a možnosť použitia vzorca na výpočet súčiniteľa trecích strát podľa Rounda je d'alej prúdenie uvažované za turbulentné. Nasleduje teda výpočet súčiniteľa trecích strát λ :

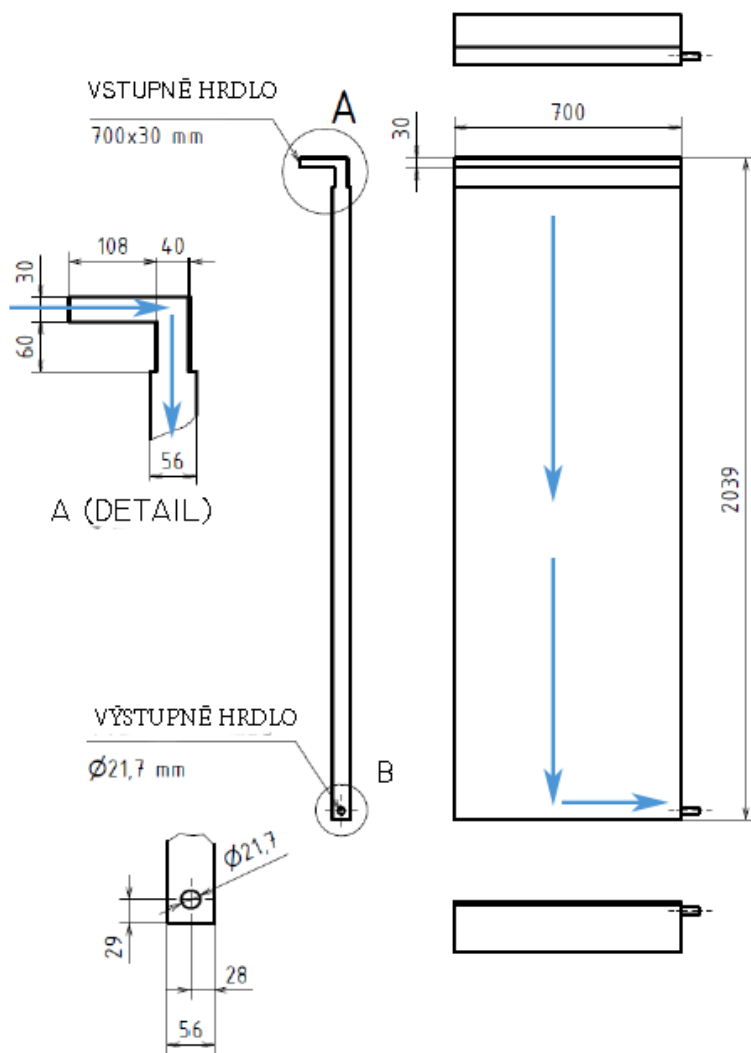
$$\lambda_4 = \left[-1,8 * \log \left(0,27 * \frac{k_o}{d_4} + \frac{6,5}{Re} \right) \right]^{-2} \quad (3.25)$$

$$\lambda_4 = \left[-1,8 * \log \left(0,27 * \frac{0,0001}{0,058} + \frac{6,5}{2732} \right) \right]^{-2} = 0,0478 \quad (3.26)$$

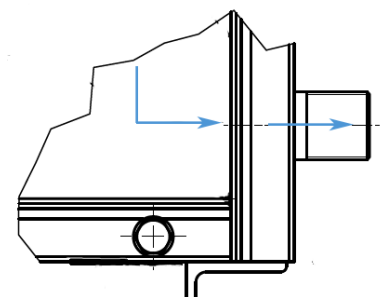
kde k_o je absolútna drsnosť ocele, pozri Tab. 1, a d_4 je hydraulický priemer. Z toho ďalej tlaková strata vo štvrtom sektore:

$$\Delta p_4 = \lambda * \frac{l_4}{d_4} * \frac{\rho}{2} * u_4^2 \quad (3.27)$$

$$\Delta p_4 = 0,0478 * \frac{0,108}{0,058} * \frac{997}{2} * 0,042^2 = 0,079 \text{ Pa}$$



Obr. 49 - Rozmery laboratórneho fotobioreaktora a zjednodušené naznačený smer prúdenia. [23]



Obr. 50 – Detail výpustného hrdla. [23]

5) Záhyb s hranou (90°)

Pre rýchlosť v piatom úseku platí $u_5 = u_4 = 0,042 \text{ m s}^{-1}$. Pre určenie súčiniteľa miestnych strát ζ_5 je použitý graf z Obr. 48. Pre hydraulický priemer $d_5 = d_4 = 0,058$ a pre $r_5 = 0,015$ m je pomer $r_5/d_5 = 0,23 \rightarrow \zeta = 2$. Ďalej je opäť použitý vzťah 3.13:

$$e_{z5} = \zeta_5 \frac{u_5^2}{2} = 2 * \frac{0,042^2}{2} = 1,764 * 10^{-3} \quad (3.28)$$

a tlaková strata v piatom úseku:

$$\Delta p_5 = e_{z5} * \rho = 1,764 * 10^{-3} * 997 = 1,758 \text{ Pa} \quad (3.29)$$

6) Prechod medzi vstupným hrdlom a komorou

$$u_6 = \frac{\dot{V}}{S_6} = \frac{8,82 * 10^{-4}}{0,04 * 0,7} = 0,031 \text{ m s}^{-1} \quad (3.30)$$

$$d_6 = \frac{4 * S_6}{o_6} = \frac{4 * 0,04 * 0,7}{2 * (0,04 + 0,7)} = 0,076 \text{ m} \quad (3.31)$$

$$Re_6 = \frac{u_6 * \rho * d_6}{\mu} = \frac{0,031 * 997 * 0,076}{8,9 * 10^{-4}} = 2640 \quad (3.32)$$

ďalej podľa 3.25 výpočet súčiniteľa trecích strát:

$$\lambda_6 = \left[-1,8 * \log \left(0,27 * \frac{k_o}{d_6} + \frac{6,5}{Re_6} \right) \right]^{-2} \quad (3.33)$$

$$\lambda_6 = \left[-1,8 * \log \left(0,27 * \frac{0,0001}{0,076} + \frac{6,5}{2640} \right) \right]^{-2} = 0,0473 \quad (3.34)$$

následne tlaková strata v sekcii 6):

$$\Delta p_6 = \lambda_6 * \frac{l_6}{d_6} * \frac{\rho}{2} * u_6^2 \quad (3.35)$$

$$\Delta p_6 = 0,0473 * \frac{0,06}{0,058} * \frac{997}{2} * 0,031^2 = 0,023 \text{ Pa} \quad (3.36)$$

7) Rozšírenie vstupného hrdla do hlavnej komory fotobioreaktora, pozri Obr. 49 – detail A

Postup je analogický k výpočtom v sekcii 1):

$$\zeta_7 = \left(1 - \frac{S_6}{S_7} \right)^2 = \left(1 - \frac{0,04 * 0,7}{0,056 * 0,7} \right)^2 = 0,082 \quad (3.37)$$

$$e_{z7} = \zeta_7 \frac{u_6^2}{2} = 0,082 * \frac{0,031^2}{2} = 3,94 * 10^{-5} \quad (3.38)$$

$$\Delta p_7 = e_{z7} * \rho = 3,94 * 10^{-5} * 997 = 0,039 \text{ Pa} \quad (3.39)$$

8) Hlavná komora fotobioreaktora

Keďže panely reaktora sú podľa [23] vyrobené z polymetylmakrylátu (PMMA), počíta sa $k_p = 0,01$; pozri Tab. 1. Dĺžka úseku je celkovou výškou (Obr. 49) mínus dĺžka úseku 7), mínus 3-násobok vzdialenosti osi spodného výpustu od spodka nádrže (takto sa vymedzí sekcia 9); $l_8 = 1862$ mm. Rýchlosť kvapaliny v komore reaktora:

$$u_8 = \frac{\dot{V}}{S_8} = \frac{8,82 \cdot 10^{-4}}{0,056 \cdot 0,7} = 0,0225 \text{ m s}^{-1} \quad (3.40)$$

d'alej hydraulický priemer

$$d_8 = \frac{4 \cdot S_8}{o_8} = \frac{4 \cdot 0,056 \cdot 0,7}{2 \cdot (0,056 + 0,7)} = 0,104 \text{ m} \quad (3.41)$$

d'alej Reynoldsovo číslo:

$$Re_8 = \frac{u_8 \cdot \rho \cdot d_8}{\mu} = \frac{0,0225 \cdot 997 \cdot 0,104}{8,9 \cdot 10^{-4}} = 2622 \quad (3.42)$$

$$\lambda_8 = \left[-1,8 \cdot \log \left(0,27 \cdot \frac{k_p}{d_8} + \frac{6,5}{Re_8} \right) \right]^{-2} \quad (3.43)$$

$$\lambda_8 = \left[-1,8 \cdot \log \left(0,27 \cdot \frac{0,00001}{0,104} + \frac{6,5}{2622} \right) \right]^{-2} = 0,0457 \quad (3.44)$$

potom tlaková strata na úseku 8):

$$\Delta p_8 = \lambda_8 \cdot \frac{l_8}{d_8} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u_8^2 \quad (3.45)$$

$$\Delta p_8 = 0,0457 \cdot \frac{1,862}{0,104} \cdot \frac{997}{2} \cdot 0,0225^2 = 0,206 \text{ Pa} \quad (3.46)$$

9) Zmena smeru prúdenia smerom k výtoku - Obr. 51

Pre jednoduchší výpočet tlakovej straty zmenou smeru v spodnej časti reaktora je vytýčená vzdialenosť od spodného okraja (87 mm – 3x hodnota vzdialenosti osi výpustu od spodného okraja). Pre výpočet hydraulického priemeru bude použitá hodnota hĺbky reaktora 56 mm a práve hodnota 87mm. Pre hydraulický priemer teda platí:

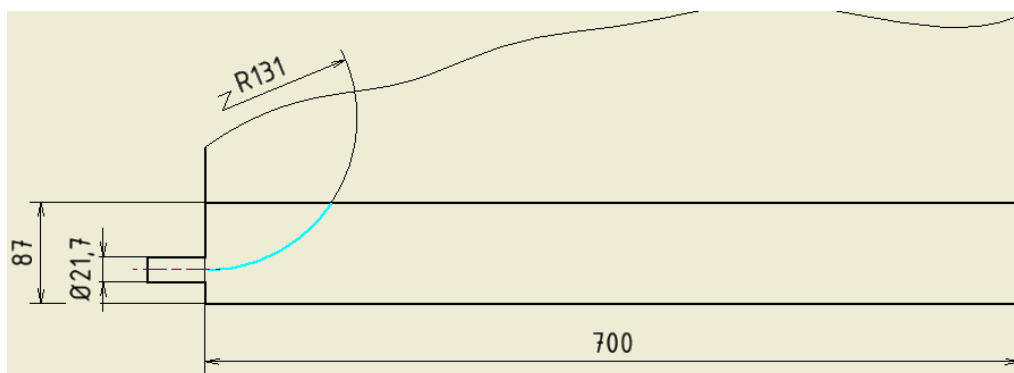
$$d_9 = \frac{4 \cdot S_9}{o_9} = \frac{4 \cdot 0,056 \cdot 0,087}{2 \cdot (0,056 + 0,087)} = 0,068 \text{ m} \quad (3.47)$$

$$u_9 = \frac{\dot{V}}{S_9} = \frac{8,82 \cdot 10^{-4}}{0,056 \cdot 0,087} = 0,181 \text{ m s}^{-1} \quad (3.48)$$

d'alej je potrebné určiť hodnotu $\zeta - r = 131$ mm, $d = 58$ mm $\rightarrow r/d = 131/58 = 2,3$. $\rightarrow \zeta_9 = 0,11$. Podľa 3.13 teda:

$$e_{z9} = \zeta_9 \frac{u_9^2}{2} = 0,11 \cdot \frac{0,181^2}{2} = 1,8 \cdot 10^{-3} \quad (3.49)$$

$$\Delta p_9 = e_{z9} \cdot \rho = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 997 = 1,796 \text{ Pa} \quad (3.50)$$



Obr. 51 – Spodná Sekcia fotobioreaktora – zmena smeru prúdenia + zúženie.

10) Zúženie komora → výpust

Keďže platí že S_1 (vstupný prierez) \gg S_2 (výstupný prierez) z rovnice 3.18 plynie, že $\zeta_{10} = 0,5$. Pre rýchlosť v zúženej časti platí:

$$u_{10} = \frac{\dot{V}}{S_{10}} = \frac{8,82 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot r^2} = \frac{8,82 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,01085^2} = 2,385 \text{ m s}^{-1} \quad (3.51)$$

$$e_{z10} = \zeta_{10} \frac{u_{10}^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{2,385^2}{2} = 1,422 \quad (3.52)$$

a nakoniec tlaková strata v sekcii 10):

$$\Delta p_{10} = e_{z9} \cdot \rho = 1,422 \cdot 997 = 1417,8 \text{ Pa} \quad (3.53)$$

Pre celkovú stratu v systéme medzi senzormi podľa Obr. 42 platí:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{10} \Delta p_i = 2021,9 \text{ Pa} \quad (3.54)$$

| \dot{V} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] | Δp [Pa] |
|--|-----------------|
| $7,55 \times 10^{-4}$ | 1480,74 |
| $7,74 \times 10^{-4}$ | 1555,89 |
| $8,00 \times 10^{-4}$ | 1664,22 |
| $8,35 \times 10^{-4}$ | 1811,6 |
| $8,61 \times 10^{-4}$ | 1925,54 |
| $8,82 \times 10^{-4}$ | 2019,76 |
| $9,17 \times 10^{-4}$ | 2184,8 |
| $9,34 \times 10^{-4}$ | 2266,7 |
| $9,71 \times 10^{-4}$ | 2450,9 |

Tab. 2 – Hodnoty analyticky zistených tlakových strát pre namerané objemové prietoky.

3.3 Meranie tlakových strát

Z diferenčného tlakového snímača prepojeného na tlakové senzory na vstupe a výstupe z reaktora bolo pri meraní odčítaných 9 hodnôt - Tab. 1. Zapojenie systému je znázornené na Obr. 42. Ku každej hodnote bol zároveň odčítaný objemový prietok. Použité snímače sú popísané v podkapitole 3.1.

| \dot{V} [m ³ s ⁻¹] | Δp [Pa] |
|---|-----------------|
| 7,55x10 ⁻⁴ | 1800 |
| 7,74x10 ⁻⁴ | 2500 |
| 8,00x10 ⁻⁴ | 2600 |
| 8,35x10 ⁻⁴ | 3000 |
| 8,61x10 ⁻⁴ | 2900 |
| 8,82x10 ⁻⁴ | 3000 |
| 9,17x10 ⁻⁴ | 3300 |
| 9,34x10 ⁻⁴ | 3400 |
| 9,71x10 ⁻⁴ | 3700 |

Tab. 3 – Namerané hodnoty: objemové prietoky a tlakové straty.

3.4 Vyhodnotenie dát

Praktická časť bola zameraná na dva spôsoby zistenia tlakových strát – experiment a analytický výpočet. Obr. 52 ukazuje porovnanie výsledkov týchto dvoch postupov. Z 9 nameraných hodnôt boli pre vyššiu presnosť výsledku zanedbané 2 skupiny dát. Výsledná rovnica trendovej spojnice pre analytický výpočet:

$$\Delta p = 3 * 10^9 * \dot{V}^{1,9999} \quad (3.55)$$

potvrďuje závislosť tlakových strát na kvadráte rýchlosti (tým aj kvadráte objemového prietoku):

$$\Delta p = f * \dot{V}^2 \quad (3.56)$$

Pri vyhodnocovaní celkovej tlakovej straty (rovnica 3.54) bolo zrejmé, že úseky s veľkým prierezom (malou rýchlosťou toku vody) mali na výsledok malé, väčšinou zanedbateľné účinky. Výrazne najväčšia tlaková strata vznikla v sekcii 10) (zúženie v mieste spojenia komory reaktora a výtokovej trúbky):

$$\Delta p_{10} = 1417,8 \text{ Pa} \quad (3.57)$$

Miestom s druhou najväčšou tlakovou stratou bolo rozšírenie v mieste spojenia vtokovej trúbky a rozvádzacej nádrže.

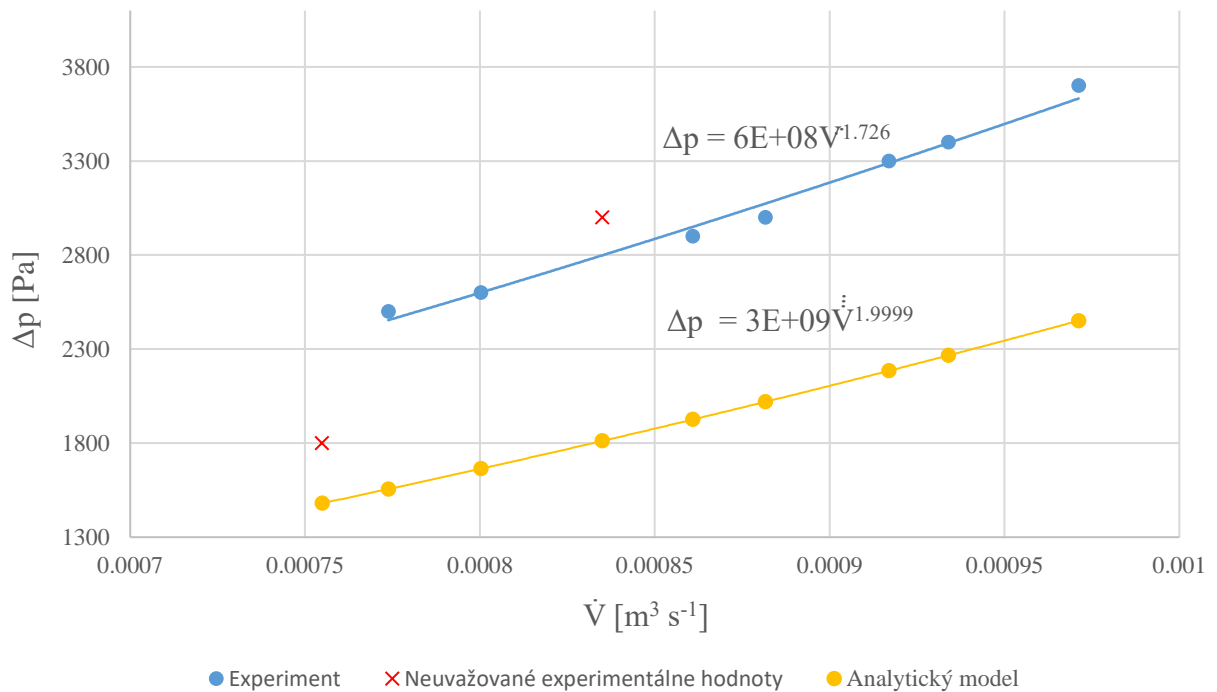
$$\Delta p_1 = e_{z1} * \rho = 0,602 * 997 = 599,9 \text{ Pa} \quad (3.58)$$

Dáta sú platné pre prietok $\dot{V} = 8,82 * 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pre zvyšné dáta ,pozri Tab. 2, boli tlakové straty vypočítané analogicky k postupu uvedenému v podkapitole 3.2.

Rovnica spojnice pre experimentálne riešenie sa tomuto výsledku približuje:

$$\Delta p = 6 * 10^8 * \dot{V}^{1,726}$$

nie však s uspokojivou presnosťou. Experiment prebiehal po znovuuvedení celého systému do chodu. Je preto pravdepodobné, že nepresnosti mohli vzniknúť nedôslednou kontrolou aparatury, zavzdušnením potrubia, výraznou fluktuáciou hladiny vo fotobioreaktore alebo z iného dôvodu. Rozdiely medzi experimentálnymi dátami a tými analytickými boli tiež jednoznačne spôsobené mnohými zjednodušeniami pri výpočte. Treba tiež poznamenať, že namiesto jedného merania by bolo vhodnejšie uskutočniť meraní niekoľko a nevhodné dáta vylúčiť.



Obr. 52 – Závislosť tlakových strát na prietoku média.

4 Záver

Hlavným cieľom bakalárskej práce bolo vypracovať rešerš zameranú na konštrukciu doskových fotobioreaktorov. Ďalším cieľom bolo uskutočniť meranie tlakových strát na laboratórnom fotobioreaktore a tiež výpočet týchto strát.

Dosiahnuté bolo: (I) uvedenie čitateľa do problematiky významu CO₂, jeho negatívneho vplyvu a možnosti spracovania a redukcie emisií CO₂; (II) predstavenie pestovania mikrorias ako jedného z možných riešení a prehľad využitia biomasy z rias; (III) popísanie rastového procesu rias; (IV) predstavenie fotobioreaktorov obecne, ich rozdelenie; (V) opísanie pozitív konfigurácie doskových fotobioreaktorov; (VI) prostredníctvom patentovej rešerše bol uskutočnený prehľad konštrukčných variantov doskových fotobioreaktorov a ich kľúčových dizajnových uzlov; (VII) vypracovanie prehľadu doskových fotobioreaktorov reálne skonštruovaných firmami a inštitúciami po celom svete; (VIII) uvedenie produktivity pestovania rias v niektorých z týchto fotobioreaktorov; (IX) popísanie zostavenia laboratórneho fotobioreaktora a jeho uvedenie do prevádzky; (X) výpočet tlakových strát v laboratórnom fotobioreaktore; (XI) nameranie tlakových strát v laboratórnom fotobioreaktore; (XII) spracovanie a porovnanie experimentálnych a vypočítaných dát.

Osobne považujem pestovanie mikrorias za veľmi inovatívnu aktivitu s veľkým potenciálom. V súčasnej dobe nevidím veľký priestor pre biopalivá z mikrorias na ohrozenie postavenia fosílnych palív. Je však pozitívne, že tento produkt si našiel svoje miesto na trhu a síce na potravinárskom či kozmetickom. Špeciálne produkty z rias sa ukazujú ako veľmi hodnotné, čo sa snaží využívať viacero firiem po celom svete.

Pri návrhu fotobioreaktora je potrebné brať do úvahy veľa faktorov: dostatočné presvetlenie kultúry, správne dlhé svetelné intervaly, dostatočné, nie však príliš agresívne miešanie, dodávanie vzduchu obohateného o CO₂ avšak minimom iných zložiek, a tak ďalej. Ťažko určiť jeden „ideálny“ koncept, keďže výber fotobioreaktora silne ovplyvňuje aj geografická poloha. Napriek tomu sa zdá, že vo veľkej oblúbe je práve doskový fotobioreaktor, pre svoj veľký objem, možnosť presvetlenia celého objemu či efektívne využitie zastavanej plochy. Hlavným faktorom pri výbere sa, pochopiteľne, ukazuje byť zriaďovacia a prevádzková cena. Tu sa dostávajú k slovu fotobioreaktory z flexibilných fólií práve pre nízku cenu

materiálov. Bolo to možné vidieť aj v kapitole 2.2.2, kde mnoho takýchto riešení bolo skúšaných vo veľkoplošných farmách.

Aj napriek všetkým otáznikom ohľadom rentability pestovania rias si myslím, že tento priemysel má svoju budúcnosť a doskové fotobioreaktory považujem za jeden z najlepších aparátov na rozšírenie viacerých prevádzok do priemyselných rozmerov.

5 Zoznam použitých symbolov

Skratkové slová

| | |
|------------------|---------------------------------|
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| PBR | fotobioreaktor |
| FPBR | doskový fotobioreaktor |
| R&D | výskum a vývoj |
| DO | rozpustený O ₂ |
| dCO ₂ | rozpustený CO ₂ |
| PAR | fotosynteticky aktívne žiarenie |
| dw | váha sušiny |
| PFD | hustota toku fotónov |
| PP | polypropylén |
| PVC | polyvinylchlorid |
| PMMA | polymetylmetakrylát |
| FS | Fakulta strojní |

Symbols

| | | |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| a | [m] | dĺžka |
| b | [m] | dĺžka |
| d | [m] | hydraulický priemer |
| e _z | [m ² s ⁻²] | merná strata energie |
| k | [m] | absolútna drsnosť materiálu |
| l | [m] | dĺžka |
| o | [m] | obvod |
| p | [Pa] | tlak |
| Δp | [Pa] | tlaková strata |
| r | [m] | polomer |
| Re | [1] | Reynoldsovo číslo |
| S | [m ²] | plocha |
| u | [ms ⁻¹] | rýchlosť prúdenia |
| V | [m ³] | objem |

\dot{V} $[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$ objemový prietok

Grécke písmená

ζ [1] súčiniteľ miestnych strát

λ [1] súčiniteľ trecích strát

μ $[\text{Pa s}]$ dynamická viskozita

ρ $[\text{kg m}^{-3}]$ hustota

6 Zoznam literatúry

- [1] LACIS, Andrew. *Greenhouse effect* [online]. McGraw-Hill Education, 2017 [cit. 2018-03-18]. DOI: 10.1036/1097-8542.299800. Dostupné z: <http://www.accessscience.com/content/greenhouse-effect/299800>
- [2] HRDLIČKA, Jan. *Technologie Carbon capture and storage: Carbon capture and storage technologies*. 1st ed. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06037-7.
- [3] SLOCOMBE, Stephen, ed. a John BENEMANN, ed. *Microalgal Production for Biomass and High-Value Products*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4822-1970-8.
- [4] VASUMATHI, K.K., M. PREMALATHA a P. SUBRAMANIAN. *Parameters influencing the design of photobioreactor for the growth of microalgae*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, 16(7), 5443-5450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.013>. ISSN 1364-0321. Dostupné tiež z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112003930>
- [5] BĚLOHLAV, Václav, Tomáš JIROUT a Lukáš KRÁTKÝ. *Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku*. Chemické Listy [online]. 2018, 112(3), 183-190 [cit. 2018-04-21]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3030/3019>
- [6] SINGH, R.N. a Shaishav SHARMA. *Development of suitable photobioreactor for algae production – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, 16(4), 2347-2353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.026>. ISSN 1364-0321. Dostupné tiež z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000275>
- [7] CHINI ZITTELLI, Graziella, Liliana RODOLFI, Niccolo BASSI, Natascia BIONDI a Mario TREDICI. *Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production*. 2013, 5, 115 s. DOI: 10.1007/978-94-007-5479-9_7. ISBN 978-94-007-5478-2.
- [8] UGWU, Charles a Hideki AOYAGI. *Microalgal Culture Systems: An Insight into their Designs, Operation and Applications*. Science Alert [online]. b.r. [cit. 2018-08-07]. Dostupné z: https://scialert.net/fulltext/?doi=biotech.2012.127.132#760488_ja

- [9] BERGSTEDT, Martin. *Rotating Algal Biofilm Reactor*. AIChE ChEnected [online]. b.r. [cit. 2018-08-07]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/chened/2013/11/rotating-algal-biofilm-reactor-on-location>
- [10] WANG, B., C. LAN a M. HORSMAN. *Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses*. *Biotechnology Advances*. 2012, 30(4), 904-912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>. ISSN 0734-9750. Dostupné tiež z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975012000328>
- [11] SLEGGERS, P.M., R.H. WIJFFELS, G. VAN STRATEN a A.J.B. VAN BOXTEL. *Design scenarios for flat panel photobioreactors*. *Applied Energy*. 2011, 88(10), 3342-3353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.037>. ISSN 0306-2619. Dostupné tiež z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191000557X>
- [12] HU, Qiang, SUMMERFELD Milton. *Photobioreactor and uses therefor*. b.r. US8198076B2. Udelené 12.06.2012.
- [13] SURYO, Ronald, J.T. Wyatt. *Lensed and striped flat panel photobioreactors*. 2013. US20130230904A1. Zapísané 05.09.2013.
- [14] FERNANDEZ GONZALEZ, Jesus. *Laminar photobioreactor for the production of microalgae*. 2013. US20130115688A1. Zapísané 09.05.2013.
- [15] YU, Andong, Young-su AHN, Sanghwa CHUNG, Jong-rak PARK, Jung PARK WOO a Jong KIM TAE. *Flat panel photobioreactor with high rigidity and multiple light reflector*. b.r. KR101207475B1. Udelené 03.12.2012.
- [16] LEVIN, Alexander. *Photobioreactor*. 2014. USA. US 20140093950 A1. Udelené 24.03.2015. Zapísané 03.04.2014.
- [17] HU, Qiang, Hugo GUTERMAN a Amos RICHMOND. *A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs*. 2000, 51, 51 s. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0290(19960705)51:151::AID-BIT63.0.CO;2-#.
- [18] DEGEN, Jörg, Andrea UEBELE, Axel RETZE, Ulrike SCHMID-STAIGER a Walter TRÖSCH. *A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect*. *Journal of Biotechnology*. 2001, 92(2), 89-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00350-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00350-9). ISSN 0168-1656. Dostupné tiež z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165601003509>

- [19] Algae Energy. *International News Services* [online]. 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z:
<http://www.internationalnewsservices.com/photo-service/algae-energy>
- [20] HOEKEMA, S., M. BIJMANS, M. JANSSEN, J. TRAMPER a R. WIJFFELS. *A pneumatically agitated flat-panel photobioreactor with gas re-circulation: anaerobic photoheterotrophic cultivation of a purple non-sulfur bacterium*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2002, **27**(11), 1331-1338. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00106-4). ISSN 0360-3199. Dostupné tiež z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902001064>
- [21] *Biofuel expert explains how future innovations could help realize algal biofuels' full potential*. Phys.org [online]. Tucson, USA, 2012 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:
<https://phys.org/news/2012-11-biofuel-expert-future-algal-biofuels.html>
- [22] SCHWARTZ, David. *A.I.M. INTERVIEW: SOLIX BIOSYSTEMS' CEO JOEL BUTLER*. *Algae Industry Magazine* [online]. 2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:
<http://www.algaeindustrymagazine.com/a-i-m-interview-solix-biosystems-ceo-joel-butler/>
- [23] ČERVENÝ, Jakub. *Laboratorní deskový fotobioreaktor*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.