

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

# LABORATORNÍ DESKOVÝ FOTOBIOREAKTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Červený** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **420481**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Procesní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Laboratorní deskový fotobioreaktor**

Název diplomové práce anglicky:

**Laboratory flat panel photobioreactor**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši zaměřenou na konstrukci a provozování deskových fotobioreaktorů.
- 2) Navrhněte vhodnou konstrukci deskového fotobioreaktoru, proveďte potřebné pevnostní výpočty, zpracujte výrobní dokumentaci a zařízení zprovozněte.
- 3) Analyticky a experimentálně stanovte hydraulické charakteristiky komory fotobioreaktoru a získaná data využijte pro validaci CFD modelu fotobioreaktoru.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

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


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

  
doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

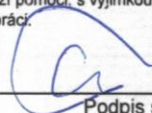
  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**26-04-2018**

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

.....

Jméno a příjmení

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D., za obětavou pomoc a poskytnutí cenných informací a rad při vypracování této diplomové práce.

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Jakub
<b>Příjmení autora:</b>	Červený
<b>Název práce česky:</b>	Laboratorní deskový fotobioreaktor
<b>Název práce anglicky:</b>	Laboratory flat panel photobioreactor
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 79 počet obrázků: 88 počet tabulek: 18 počet příloh: 5
<b>Akademický rok:</b>	2017/2018
<b>Jazyk práce:</b>	český
<b>Ústav:</b>	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	N2301 Strojní inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
<b>Oponent:</b>	
<b>Konzultant práce:</b>	
<b>Zadavatel:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky

## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na problematiku kultivace mikrořas ve fotobioreaktorech a na návrh, sestavení a zprovoznění laboratorního deskového fotobioreaktoru poloprovozních rozměrů. V úvodu práce je vypracována rešerše zabývající se technologií kultivace mikrořas, která analyzuje moderní trendy v oblasti pěstování mikrořas. Hlavním cílem této práce je navrhnout konstrukční řešení fotobioreaktoru, které splňuje předepsané parametry. Zkonstruovaný fotobioreaktor bude sloužit pracovníkům ústavu k dalším vědeckým činnostem. Dále je provedena CFD simulace proudění média v prostoru fotobioreaktoru, jejíž závěry jsou porovnávány se skutečným zařízením. CFD model fotobioreaktoru je validován na základě porovnání naměřených a vypočtených tlakových ztrát při proudění média v prostoru nádrže fotobioreaktoru, validovaný model bude moci být použit pro další vědecké účely. V rámci práce je popsán postup návrhu zařízení spolu s parametry, které musí splňovat, a omezeními, které je nutné dodržet. V rámci konstrukčního návrhu zařízení jsou v práci zobrazeny 3D modely zařízení, výrobní výkres celého zařízení je připojen v příloze této diplomové práce.

**Klíčová slova:** mikrořasy, kultivace, biomasa, fotobioreaktor, oxid uhličitý, ekonomická rentabilita, konstrukce deskového fotobioreaktoru

## **Annotation**

This master thesis is focused on the cultivation of microalgae by using photobioreactors. In the introductory part is presented overview of modern trends in cultivation microalgae. Main goal of this thesis is to design the scale-up flat panel photobioreactor for laboratory use which meets the prescribed parameters. Photobioreactor was constructed and put into operation. Flat panel photobioreactor will be used for scientific activities by academic workers in the future. In this work is then calculated CFD simulation of fluid flow in the photobioreactor. Conclusions of this simulation is compared with real data obtained by measuring on the actual photobioreactor for validation of the CFD model. CFD model is validated by comparison of calculated and measured pressure drop of process media flowing at different speeds. Validated CFD model can be used in the future for scientific purposes. The thesis describes the design process of flat panel photobioreactor with the prescribed parameters and limitations which must be observed. In the design section are presented 3D models of the apparatus. Production drawing of photobioreactor is attached in the appendix.

**Key words:** microalgae, cultivation, biomass, photobioreactor, carbon dioxide, economic rentability, design of flat panel photobioreactor

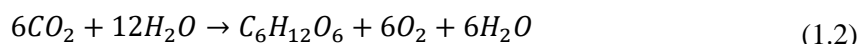
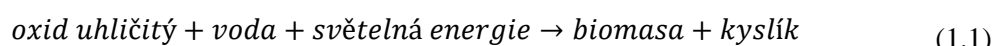
**Využití:** Zařízení poloprovozních parametrů ke kultivaci mikrořas.

# OBSAH

1	Úvod.....	7
1.1	Metody pěstování mikrořas.....	8
1.2	Zdroj oxidu uhličitého.....	10
1.3	Ekonomické využití mikrořas.....	13
1.4	Cíle práce.....	17
2	Deskový fotobioreaktor.....	18
2.1	Patentová rešerše.....	19
2.2	Konstrukční řešení deskových fotobioreaktorů.....	27
2.3	Deskové fotobioreaktory v průmyslu.....	28
2.4	Vlastní doporučení při konstrukci uzavřených fotobioreaktorů.....	30
3	Konstrukce fotobioreaktoru.....	33
3.1	Pevnostní kontrola původního návrhu.....	34
3.2	Návrhy na vylepšení a pevnostní analýza.....	36
3.3	Konstrukce nového fotobioreaktoru.....	40
4	Výroba fotobioreaktoru.....	43
4.1	Montáž fotobioreaktoru.....	43
4.2	Zprovoznění fotobioreaktoru.....	45
5	Procesní charakteristiky.....	48
5.1	Analytický výpočet tlakové ztráty.....	48
5.2	Numerický výpočet tlakové ztráty.....	58
5.3	Experimentální měření tlakové ztráty.....	61
5.4	Zhodnocení tlakové ztráty.....	63
5.5	Analýza proudění fotobioreaktorem.....	64
5.6	Optimalizace proudění fotobioreaktorem.....	67
6	Závěr.....	70
	Seznam symbolů.....	72
	Seznam obrázků.....	73
	Seznam tabulek.....	75
	Seznam literatury.....	76
	Seznam příloh.....	79

# 1 Úvod

Pěstování mikrořas se v posledních několika letech stalo předmětem zkoumání vědců po celém světě. Stejně jako rostliny, mikrořasy využívají oxygenní fotosyntézy, při které přeměňují světelnou energii, oxid uhličitý a vodu na kyslík a chemickou energii, kterou ukládají ve svém těle, biomase (Byrtusová, 2016; Masojídek et al., 2016). Rovnice fotosyntézy je:



Z biologického hlediska se jedná o prokaryotní sinice a eukaryotní řasy – převážně jednobuněčné organismy, jejichž velikost je v řádu mikrometrů. Vývojově se jedná o nejstarší mikroorganismy, které před více než 2,5 miliardami let začaly tvořit kyslíkatou atmosféru Země. Vyvinuly se v nepřeberné množství druhů od vodních druhů po půdní a lze je nalézt ve všech ekosystémech. Nejznámější skupina mikrořas, fytoplankton, tvoří základ potravního řetězce a je odpovědný za téměř polovinu globální primární fotosyntetické produkce (Masojídek et al., 2016). Právě schopnost fotosyntézy, tedy zpracování oxidu uhličitého na biomasu, se stalo předmětem zkoumání. Rychlost růstu mikrořas je oproti vyšším rostlinám podstatně vyšší díky krátkým reprodukčním cyklům, jednoduché buněčné struktuře a malým nárokům na vedlejší metabolické funkce (Byrtusová, 2016; Masojídek et al., 2016). Biomasa může sloužit jako surovina pro produkci biopaliv, pigmentů, léčiv, potravinových doplňků a dalších cenných chemických látek (Červený, 2016).

Přestože je myšlenka pěstování mikrořas nejčastěji spojována s několika posledními lety a je představována jako řešení globálního oteplování a zmenšujících se zásob ropy, pokusy o efektivní pěstování mikrořas probíhaly již na přelomu 19. a 20. století (Borowitzka, 1998). Proces může probíhat v otevřených nádržích nebo uzavřených fotobioreaktorech. Nádrž, stejně jako reaktorů, existuje celá řada a každá varianta má své výhody i nevýhody:

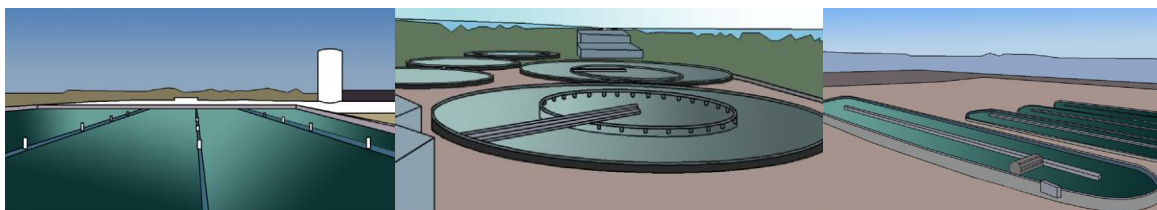
Druh reaktoru	Homogenita	Využití světla	Smykové napětí	Sterilita
Nemíchaná nádrž	velmi špatná	velmi špatné	velmi nízké	žádná
Kruhová míchaná nádrž	dobrá	špatné	nízké	žádná
Korytový systém míchaný	špatná	špatné	nízké	žádná
Válcový reaktor	dobrá	špatné	vysoké	dobrá
Deskový reaktor	velmi dobrá	velmi dobré	střední	dobrá
Trubkový reaktor	velmi dobrá	velmi dobré	střední	dobrá

Tabulka 1.1 Způsoby pěstování mikrořas (Borowitzka, 1998)



## 1.1 Metody pěstování mikrořas

Otevřené nádrže jsou nejsnazší a nejstarší metodou pěstování. Jedná se vždy o mělkou nádrž, která může či nemusí být míchaná. Jejich výhodou jsou nízké náklady na pořízení. Díky otevřenému systému je relativně snadné využívat slunečního záření, zároveň ale také dochází k velkému odparu vody z hladiny a je zde velmi vysoké riziko kontaminace bakteriemi nebo jinými druhy mikrořas (Byrtusová, 2016). Největším problémem otevřených nádrží je prostupnost světla médiem, která je pouze zhruba 5 cm od hladiny, zbytek média zůstává neprosvětlen. Nádrže jsou obvykle hluboké 40 – 60 cm, což znamená, že výnos řas vztahený na množství média je velmi nízký (Zittelli et al., 2013).



Obrázek 1.1 Nemíchaná nádrž, kruhová míchaná nádrž, korytový systém (Razzak et al., 2013)

Uzavřené reaktory umožňují vyšší kontrolu nad médiem, pH, teplotou, koncentrací CO<sub>2</sub>. Jelikož se jedná o uzavřený systém, nehrozí zde žádné nebezpečí kontaminace z okolí. Investiční náklady jsou vyšší než v případě otevřených nádrží. Vhodnou konstrukcí reaktoru, tloušťkou reaktoru maximálně 5 cm, lze docílit vyššího prosvětlení řas a tím vyššího výnosu řas na množství zpracovávaného média. V závislosti na rozmístění reaktorů platí, že uzavřené reaktory mají vyšší výnos řas na zastavenou plochu oproti otevřeným nádržím. Provozní náklady mají uzavřené reaktory vyšší z důvodu, že je zde médium dopravováno čerpadly a v prostoru reaktoru jsou zpravidla vyšší hydromechanické ztráty, přestože u otevřených reaktorů musíme promíchávat i neosvětlené médium, což také zvyšuje provozní náklady, viz předchozí odstavec. V současnosti jsou uzavřené fotobioreaktory upřednostňovány před otevřenými nádržemi (Byrtusová, 2016; Zittelli et al., 2013).

Typickými zástupci uzavřených fotobioreaktorů jsou trubkový a deskový fotobioreaktor, viz obrázek 1.2 a obrázek 1.3. Trubkový reaktor se skládá z průhledných trubek, propojených do série, ve kterých proudí zpracovávané médium. Průměr trubek je z pravidla do 5 cm, aby bylo zajištěno ideální prozáření média. Podle orientace trubek se trubkové fotobioreaktory dělí na horizontální, vertikální, nakloněné nebo spirální (Zittelli et al., 2013). O proudění média reaktorem se stará čerpadlo. Déle je médium aerováno, což zajišťuje intenzivnější přestup plynů do média, lepší homogenizaci a zabraňuje usazování mikrořas. Obecně se uzavřené reaktory skládají z osvětlené části, ve které probíhá růst mikrořas, a temné části, kde jsou umístěna čerpadla, kde je do média přiváděn oxid uhličitý a kde je ze systému odváděno zpracované médium. (Bělohav et al., 2017; Zittelli et al., 2013)



**Obrázek 1.2 Trubkový fotobioreaktor (Greenwell et al., 2010)**

Deskový fotobioreaktor je úzká komora vytvořená z průhledných desek, které umožňují prozařování média v komoře. Komora fotobioreaktoru může být různě členěna pro zajištění optimálního proudění. Stejně jako v případě trubkových fotobioreaktorů se o cirkulaci stará čerpadlo umístěné v temné části systému. Aerace pomáhá k intenzifikaci přestupu plynu do média a zabraňuje sedimentaci (Bělohav et al., 2017; Zittelli et al., 2013).



**Obrázek 1.3 Deskový fotobioreaktor (Bělohav et al., 2017)**

Do skupiny uzavřených fotobioreaktorů se dále řadí válcové fotobioreaktory. Jedná se o válcové nádoby, které jsou osvětleny z vnějšku nebo umělým osvětlením zevnitř nádoby. Médium je aerováno často přímo oxidem uhličitým. Velkou nevýhodou válcových reaktorů je nízké prozáření zpracovávaného média. Pro zajištění rovnoměrného prozáření jsou nádoby vybaveny míchadly, která jsou volena speciálně tak, aby nedocházelo k narušení struktur mikrořas (Bělohav et al., 2017)



Obrázek 1.4 Válcový fotobioreaktor (Bělohav et al., 2017)

Kromě těchto hlavních druhů fotobioreaktorů existuje ještě množství dalších. Všechny ale svým konstrukčním uspořádáním vycházejí z těchto tří základních. Například „Manifold photobioreactor“ je obdoba trubkových fotobioreaktorů, v tomto případě ale nejsou trubky zapojeny do série za sebou, ale jsou přes rozdělovač rozvedeny paralelně do několika trubek, které jsou na druhé straně opět spojeny do jednoho výtokového hrdla. „Flexible film panel“ jsou zase obdobou deskových fotobioreaktorů s tím rozdílem, že místo pevných komor zde slouží průhledné pytle, které jsou naplněny médiem a připevněny na rám. Tyto fotobioreaktory slibují výrazné snížení ceny těchto zařízení (Zittelli et al., 2013).

## 1.2 Zdroj oxidu uhličitého

Z rovnice fotosyntézy (1.2) vychází, že pro získání jednoho molu biomasy ( $C_6H_{12}O_6$ ) je potřeba šest molů oxidu uhličitého a 6 molů vody. Z oxidu uhličitého získávají řasy uhlík, jehož hmotnostní koncentrace v sušině biomasy je zhruba 50 %. Molární hmotnost oxidu uhličitého je  $44 \text{ kg kmol}^{-1}$  a molární hmotnost čistého uhlíku je  $12 \text{ kg kmol}^{-1}$ . Ze vztahu:

$$\frac{44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}_{(CO_2)}}}{12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}_{(C)}}} * \frac{0,5 \text{ g}_{(C)}}{1 \text{ g}_{(biomasa)}} = 1,83 [\text{kg}_{(CO_2)} \text{ kg}_{(biomasa)}^{-1}] \quad (1.3)$$

vyplývá, že na vypěstování jednoho kilogramu suché biomasy je potřeba dodat 1,83 kg oxidu uhličitého za předpokladu, že veškerý oxid uhličitý dodaný do systému bude mikrořasami zpracovaný (Doucha et al., 2005; Bělohav et al., 2017).

V současné době je oxid uhličitý pro potřeby kultivace mikrořas nejčastěji získáván jako vedlejší produkt při chemických reakcích, při kterých vzniká čistý oxid uhličitý. Výhodou toho je, že plyn, který do média, ve kterém jsou mikrořasy obsaženy, vstupuje, má přesně dané složení a neobsahuje žádné nežádoucí látky, které by mohly omezit nebo úplně zastavit růst mikrořas. Další výhodou je to, že vyprodukovaná biomasa neobsahuje žádné nežádoucí látky a lze ji použít i například pro potravinářský průmysl. Nevýhodou je, že oxid uhličitý musí být pro potřeby kultivace vyráběn a dopravován, nejčastěji ve stlačeném stavu ve tlakových lahvích. To není velký problém

v případě malých laboratorních zařízení, na kterých jsou zkoumány vlastnosti procesů, v případě scale-up zařízení by to ale představovalo velkou finanční a logistickou zátěž (Eiga.org, 2002). Zajímavým zdrojem oxidu uhličitého by mohly být spaliny vznikající při spalování fosilních paliv, které jinak nemají žádné využití a snížení množství oxidu uhličitého, který v nich odchází do atmosféry, by bylo navíc prospěšné pro životní prostředí. Výrazným problémem této varianty je chemické složení spalin, které při spalování vznikají. Orientační emisní hodnoty uhelných elektráren jsou:

Měřené látky	Orientační hodnoty
O <sub>2</sub>	5 – 9 % obj.
CO	250 mg m <sup>-3</sup>
CO <sub>2</sub>	15 – 18 obj.
NO <sub>x</sub>	150 – 200 mg m <sup>-3</sup>
SO <sub>2</sub>	150 – 200 mg m <sup>-3</sup>

**Tabulka 1.2 Orientační emisní hodnoty tepelných elektráren**  
(Testo, 2018; Vyhláška č. 415/2012 Sb)

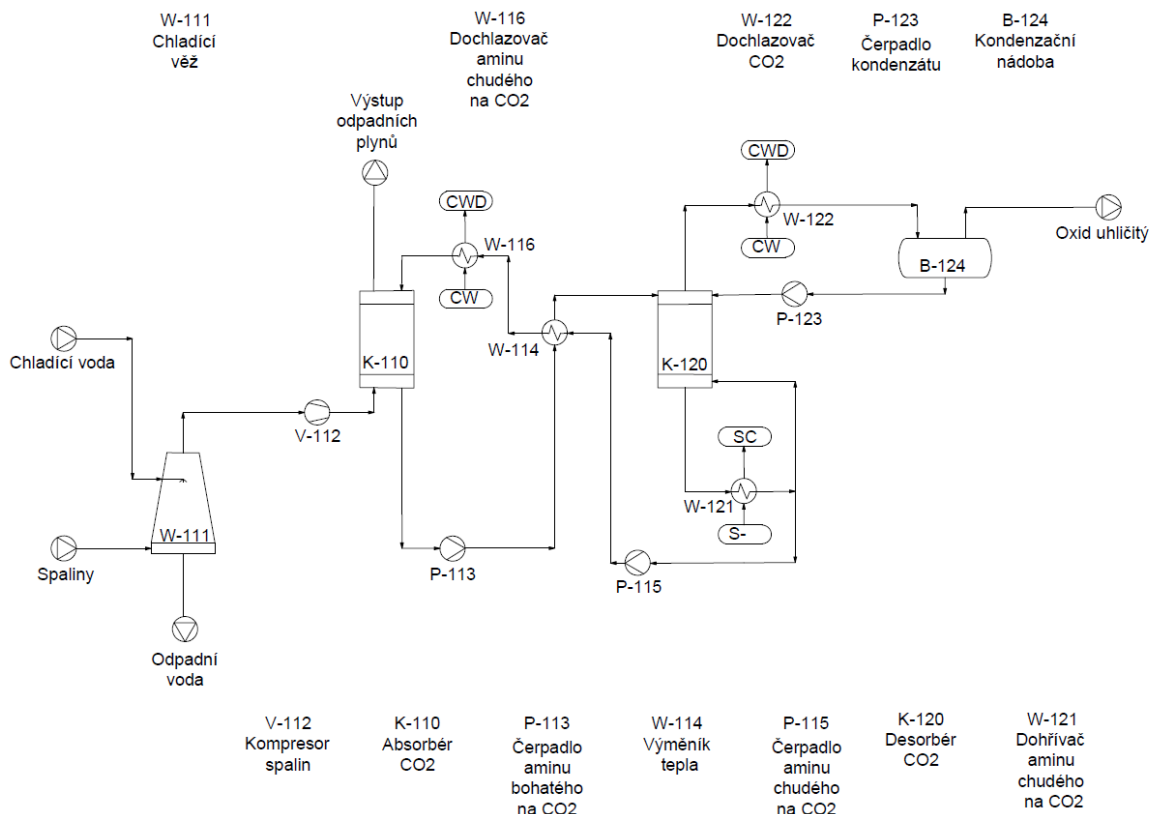
Jednou z možností využití těchto spalin je zavést je přímo do komory fotobioreaktoru. Otázkou ale je, jakým způsobem budou buňky mikrořas reagovat na nadbytečné chemické látky ve spalinách obsažené. Názory vědců na tento problém se liší. Negoro et al. (1991) uvádí, že SO<sub>2</sub> nemá významný vliv na růst mikrořas do koncentrace 50 ppm (ca 140 mg m<sup>-3</sup>), při koncentraci 400 ppm (ca 1 130 mg m<sup>-3</sup>) se růst výrazně zpomalí a při testech se po 20 hodinách dokonce úplně zastavil. Testování se provádělo na třech druzích mikrořas, Nannochloris, Nannochloropsis a Phaeodactylum. NO při koncentraci 300 ppm (ca 396 mg m<sup>-3</sup>) také výrazně ovlivňuje rychlost růstu mikrořas, Nannochloropsis nerostl vůbec a Nannochloris začal růst až po určité době. Hauck et al. (1996) uvádí rozdílné výsledky vlivu NO<sub>x</sub> a SO<sub>2</sub> na zkoumané druhy mikrořas, Chlorella vulgaris a Cyanidium caldarium. Mikrořasy nejdříve vystavili simulovaným spalinám s obsahem SO<sub>2</sub> 200 ppm (ca 564 mg m<sup>-3</sup>). Bylo zjištěno, že druh Chlorella vulgaris při těchto podmínkách nerostl vůbec a Cyanidium caldarium rostl 130x pomaleji než v plynech, které SO<sub>2</sub> neobsahují. Tyto vlastnosti jsou spojovány s ideálním pH, při kterém tyto mikrořasy rostou, Chlorella vulgaris preferuje neutrální prostředí, zatímco Cyanidium caldarium prostředí kyselé. Právě kyselost prostředí SO<sub>2</sub> ovlivňuje. Pro Cyanidium caldarium byla dále zkoumána citlivost na NO<sub>x</sub>, kde bylo stanoveno, že při koncentraci 50ppm (ca 66 mg m<sup>-3</sup>) NO<sub>x</sub> nedochází k žádnému významnému ovlivnění produkce mikrořas. Z uvedených poznatků je patrné, že rozmanitost spektra mikrořas se projevuje i v podmínkách, ve kterých je lze pěstovat. Příliš vysoký obsah SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub> řasám neprospívá, ale při relativně nízkých koncentracích oxidů dusíku a síry, které odcházejí z uhelných elektráren, viz tabulka 1.2, splňujících aktuální emisní limity, jsou vybrané druhy mikrořas schopny růst bez problémů. Na růst mikrořas má vliv také oxid uhličitý. Maximální obsah CO<sub>2</sub> ve kterém jsou vybrané

druhy řas schopny růst, viz tabulka 1.3. Ideální množství oxidu uhličitého se podle druhu mikrořas pohybuje v rozmezí 5–20 % obj. (Oilgae, 2018).

Druh	Maximální koncentrace CO <sub>2</sub>
Cyanidium celdanum	100 % obj.
Scenedesmus sp.	80 % obj.
Chlorococcum littorale	60 % obj.
Synechococcus elongates	60 % obj.
Euglena gracilis	45 % obj.
Chlorella sp.	40 % obj.
Eudorine sp.	20 % obj.
Dunaliella tertiolecta	15 % obj.
Nannochloris sp.	15 % obj.
Chlamydomonas sp.	15 % obj.
Tetraselmis sp.	14 % obj.

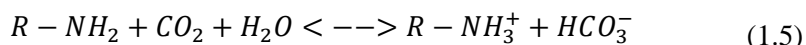
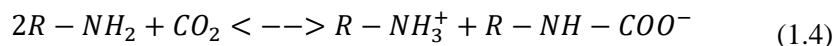
Tabulka 1.3 Maximální koncentrace CO<sub>2</sub> pro kultivaci vybraných řas (Oilgae, 2018)

Pokud je koncentrace oxidu uhličitého ve spalínách příliš nízká, lze ho separovat pomocí aminové vypírky (Němec, 2012). Princip této technologie spočívá v chemické absorpci oxidu uhličitého do absorbentu tvořeného aminy a následné desorpci čistého oxidu uhličitého. Zjednodušené schéma linky na separaci oxidu uhličitého:



Obrázek 1.5 Separace oxidu uhličitého, PDF (Červený, 2018b)

Prvním krokem je zchlazení spalin na teplotu 50 °C pro zajištění efektivní absorpce. Spaliny jsou pak přes kompresor hnány do absorbéru při tlaku 50kPa, kde dochází k chemické reakci mezi spalinami a směsí aminů (Huertas et al., 2015; Němec, 2012; Wichterlová et al., 2008). Ze skupiny aminů je jako absorbent použit primární amin MEA – monoethanolamin. Reakce oxidu uhličitého s aminy probíhá podle rovnic:



Huertas et al. (2015) uvádí, že pokud reakce probíhá podle rovnice číslo (1.4) a za ideálních podmínek, potřebujeme pro absorpci jednoho molu CO<sub>2</sub> dva moly aminu, neboli reakce probíhá v poměru 360 g CO<sub>2</sub>/Kg MEA. Nestabilní karbamáty mohou ale hydrolyzovat a vytvářet bikarbonáty (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a reakce probíhá podle rovnice číslo (1.5). Pak je pro absorpci jednoho molu CO<sub>2</sub> za ideálních podmínek potřeba jeden mol aminu, reakce tak probíhá v poměru 720 g CO<sub>2</sub>/Kg MEA (Huertas et al., 2015). Kromě CO<sub>2</sub> s aminy reagují i další látky, které mohou být obsaženy ve spalinách: O<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HF (Huertas et al., 2015). Při použití simulovaných spalin (75 % obj. N<sub>2</sub>, 20 % obj. CO<sub>2</sub>, 5 % obj. O<sub>2</sub>, 1100 ppm SO<sub>2</sub>, 1025 ppm NO, 75 ppm NO<sub>2</sub>) a 30% vodného roztoku MEA bylo zjištěno, že SO<sub>2</sub> se kompletně absorbuje, NO<sub>2</sub> se absorbuje z 80 % a O<sub>2</sub> a NO se neabsorbují téměř vůbec (Dubois a Thomas, 2013). Při pokusu bylo stanoveno, že při složení spalin 15 % CO<sub>2</sub>, 5 % O<sub>2</sub> a 80 % N<sub>2</sub> se v reálném případě do 1 Kg MEA absorbuje 324 g CO<sub>2</sub> (Huertas et al., 2015)

### 1.3 Ekonomické využití mikrořas

Jak bylo uvedeno v kapitole číslo 1, mikrořasy tvoří základ potravního řetězce mořského světa. Jejich buňky jsou bohaté na proteiny a vitamíny, které jsou pro mořské živočichy nezbytné. První komerční pěstování mikrořas bylo provedeno v šedesátých letech minulého století v Japonsku, kde sloužily jako potravinové doplňky. Odtud se později rozšířily do USA, Indie, Izraele a Austrálie. Bohužel jen velmi malé množství druhů mikrořas bylo označeno jako bezpečné ke konzumaci (Adeniyi et al., 2018). Potenciál využití mikrořas je ale mnohem větší. National Coal Council Spojených států amerických ve svém přehledu z roku 2016, ve kterém se věnuje mimo jiné ekonomické hodnotě potenciálních produktů, uvádí, že již v současnosti je trh s cennými produkty, které jsou vyráběné z mikrořas, relativně rozšířený. Přehled produktů, které lze z mikrořas produkovat a jejich orientační výkupní cena, viz následující tabulky:

<b>Produkt</b>	<b>Způsob výroby</b>	<b>Výkupní cena</b>
Biodiesel	Transesterifikace	2,27 USD/gal
Bioplyn	Anaerobní digesce	1,92 USD/gal
Bioethanol	Fermentace	3,96 USD/gal
Letecká paliva	Hydrogenace, gasifikace	2,49 USD/gal
Elektrická energie	Spalování	0,13 USD/kWh

**Tabulka 1.4 Produkty z mikrořas, náhrada za fosilní paliva, cena (National Coal Council, 2016)**

<b>Produkt</b>		<b>Výkupní cena</b>
Léky, kosmetika, biostimulanty, potravinové doplňky	Proteiny, sacharidy, oleje	50 USD/kg
	Astaxanthin, $\beta$ -karoten	275 – 2 750 USD/kg
	Omega-3 mastné kyseliny	50 000 USD/kg
	Stimulanty růstu	37,5 – 312,5 USD/kg
Bioplasty		1,75 USD/kg
Biohnojiva		0,25-0,63 USD/kg

**Tabulka 1.5 Produkty z mikrořas, potraviny a cenné látky, cena (National Coal Council, 2016)**

Pěstování mikrořas se nejčastěji spojuje s produkcí bionafty. Její výkupní cena je ale velmi nízká, viz tabulka 1.4. Možností, jak produkci zefektivnit, je produkovat z vhodných druhů mikrořas kromě bionafty i další ekonomicky cenné produkty, viz tabulka 1.5. Například astaxanthin nebo  $\beta$ -karoten produkovaný z mikrořas má sice malé, ale stabilně se rozvíjející postavení na trhu. Prodejní cena těchto potravinových doplňků může dosahovat až 2 750 USD/kg, což v porovnání s výkupní cenou bionafty 2,27 USD/gal působí lákavě (National Coal Council, 2016). Je ale nutné si uvědomit, že koncentrace astaxanthinu v sušině je maximálně 4 % hm., v závislosti na druhu mikrořasy (Panis a Carreon, 2016). Beta-karoteny obvykle tvoří 0,1 – 2 % hm. sušiny mikrořas (Chagas et al., 2015). Objemová koncentrace lipidů, suroviny pro výrobu bionafty, je v sušině mikrořas zhruba 40 % obj. (Panis a Carreon, 2016). Za předpokladu 100% konverze lipidů na biodiesel a výše uvedených cen za jednotlivé produkty lze stanovit potenciální ekonomický zisk ze zpracované sušiny mikrořas:

<b>Produkt</b>	<b>Podíl produkt / zpracovaná sušina</b>	<b>Cena zpracovaných mikrořas</b>
Astaxanthin	40 g/kg	110 USD/kg
$\beta$ -karoten	20 g/kg	55 USD/kg
Bionafta	0,4 dm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup>	0,24 USD/dm <sup>3</sup>

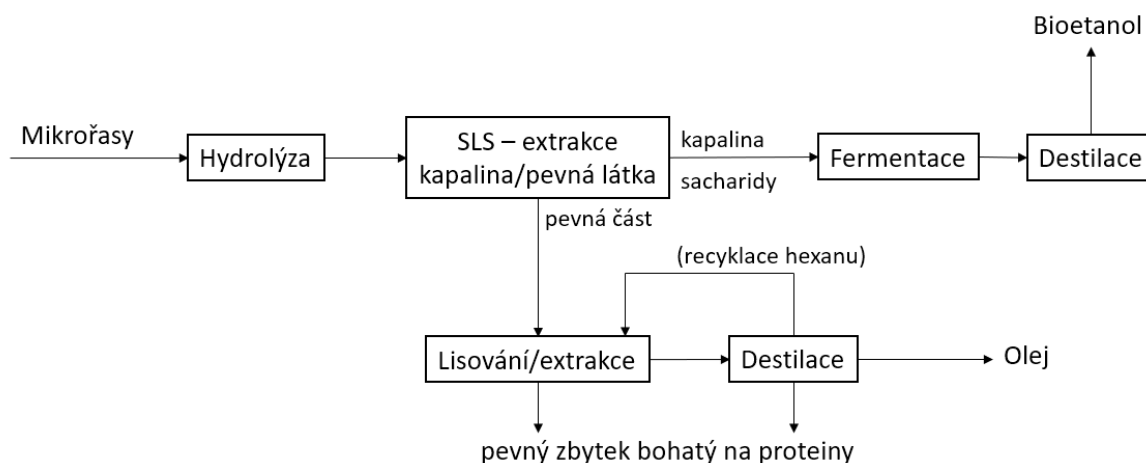
**Tabulka 1.6 Teoretický ekonomický zisk z jednotky mikrořas**

Z tabulky výše je patrné, že produkce biopaliv se oproti ostatním produktům nevyplácí. Kromě výkupní ceny surovin je dále potřeba uvažovat také náklady na výrobu jednotlivých produktů. V současnosti provozované technologie na zpracování mikrořas jsou založené na produkci pouze jednoho produktu, kdy finálním produktem jsou sušené mikrořasy s určitým obsahem požadované



látky, například astaxanthinu. Výhodou tohoto řešení je relativně jednoduché zpracování, mikrořasy musejí být pouze usušeny, případně namlety na prášek. Nevýhodou ale je, že tímto způsobem zůstává nevyužito velké množství dalších látek, respektive jsou obsaženy v produktech, kde nejsou žádány.

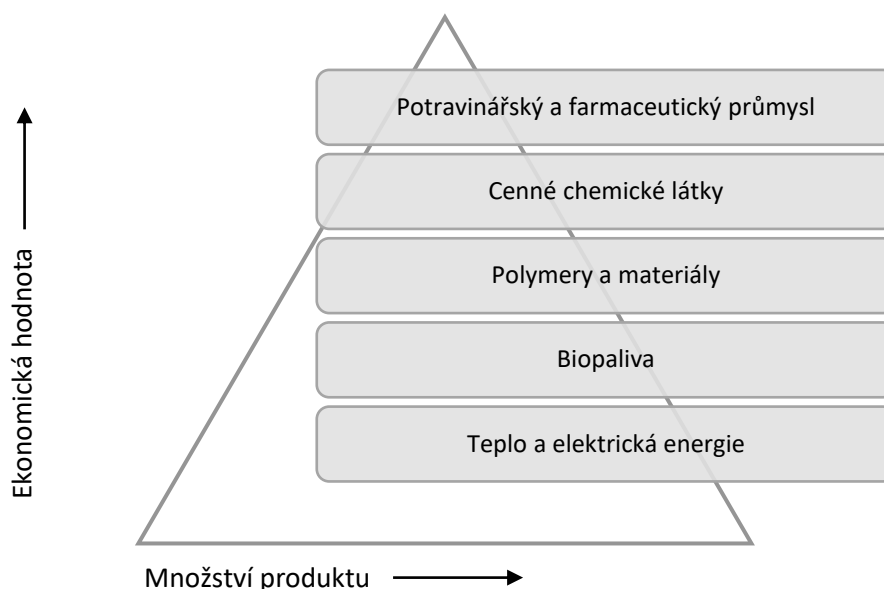
Příklad biorafinerie pro zpracování mikrořas na spektrum produktů uvádí ve své práci Dong et al. (2016), viz obrázek 1.6. Myšlenkou je efektivně zpracovávat veškeré suroviny, které mikrořasy nabízí. Buňka mikrořasy se skládá ze 40 % obj. z lipidů, ze 30 % obj. z proteinů, ze 20 % obj. ze sacharidů a 10 % obj. tvoří zbytek (Panis a Carreon, 2016). Principem biorafinerie je nejprve pomocí kyselé hydrolyzy a následné extrakce kapalně fáze odloučit z buněk mikrořas sacharidy, které mohou být následně zpracovány pomocí anaerobní fermentace na bioetanol, případně další produkty. Z pevné části je možné vylisovat, případně vyextrahovat lipidy, které lze například použít k výrobě biodieselu. Pevný zbytek, který odchází jako odpad z lisování a extrakce olejů, je bohatý na proteiny a může najít své uplatnění například při výrobě krmiv či potravinových doplňků (Dong et al., 2016).



Obrázek 1.6 Víceproduktová biorafinerie (Dong et al., 2016)

Jak bylo uvedeno výše, vzhledem k výkupní ceně jednotlivých produktů, které lze z mikrořas získat, je ekonomicky výhodnější vyrábět ceněné potravinové doplňky, chemické látky a materiály než biopaliva, která mají výkupní cenu nízkou a v současné době je jejich výroba stále nerentabilní, viz obrázek 1.7. Výrobní cena biodieselu z mikrořas je v současné době zhruba 4x vyšší než výrobní cena dieselu získaného zpracováním ropy (Rupier, 2016).

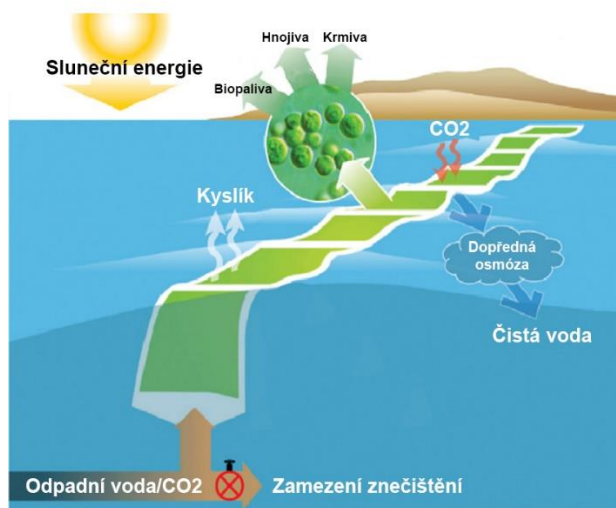




Obrázek 1.7 Produkty a jejich ekonomická hodnota (Červený, 2016)

Ze studie proveditelnosti zařízení pro pěstování mikrořas z odpadních spalin uhelné elektrárny: *Modernizace uhelné elektrárny o zařízení na separaci oxidu uhličitého a jeho využití* (Červený, 2018b) vyplývá, že limitní výkupní cena produkovaných mikrořas je okolo 2,5 Kč/kg sušiny při době návratnosti investice 20 let. Studie je uvažována jako modernizace stávající uhelné elektrárny, která by byla doplněna o zařízení pro separaci oxidu uhličitého, viz obrázek 1.5, a deskové fotobioreaktory schopné teoreticky produkovat 24 986 tun mikrořas ročně. Kultivace mikrořas by probíhala kontinuálně 24 hodin denně za použití umělého osvětlení. Pěstování mikrořas za použití pouze slunečního záření vyšla pro oblast České republiky jako nerentabilní z důvodu malé intenzity slunečního záření v průběhu roku při téměř shodných investičních nákladech. Studie předpokládá cenu zařízení a jeho výstavby 186 190 000 Kč. Provozní náklady na energie a média pro produkci mikrořas jsou 539 Kč/tunu produktu. Studie nepočítá se zpracováním produkovaných mikrořas, tedy ani se sušením, což je energeticky velmi nákladná operace (Červený, 2018b).

Velmi zajímavou myšlenkou se jeví využití mikrořas pro úpravu vody, viz obrázek 1.8. Myšlenkou technologie je využívat odpadní vodu, která by byla jinak vypuštěna do recipientů. Mikrořasy by odstranily chemický a biologický odpad z vody a produkovaly biomasu a čistou vodu, viz rovnice fotosyntézy (1.2).



Obrázek 1.8 Mikrořasy pro úpravu vody (Ziolkowska a Simon, 2013)

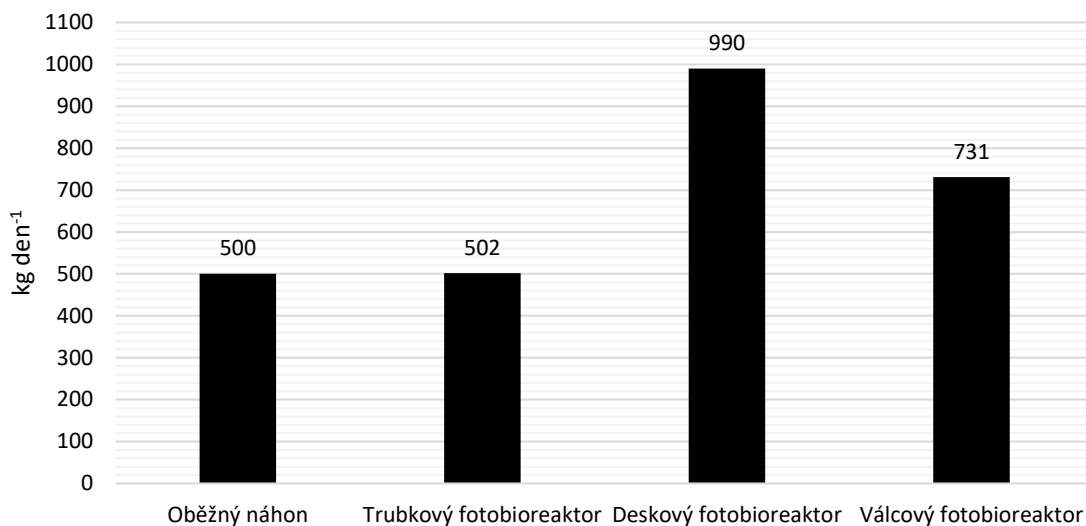
## 1.4 Cíle práce

I přes mnohaleté snahy množství vědců po celém světě je vývoj kultivace mikrořas pomocí fotobioreaktorů stále ve svých počátcích. Obecným principem je přeměna potenciálně škodlivého oxidu uhličitého na jiné neškodné látky, které mohou být dále využity. Tyto technologie tedy mají potenciál být velkým přínosem z hlediska ekonomického, energetického i enviromentálního. V současné době se věnuje velká pozornost deskovým fotobioreaktorům, které mají výhodu stoprocentní kontroly nad zpracovávaným médiem. Nevýhodou je ale jejich vysoká pořizovací cena a nejasné provozní náklady.

Cílem této diplomové práce je na základě odborné literatury sepsat informace o současných trendech v oblasti kultivace mikrořas, obzvláště pomocí deskových fotobioreaktorů. Dále navrhnout a zprovoznit deskový fotobioreaktor poloprovozních parametrů pro laboratorní účely, který by splňoval předepsané parametry. Provést analýzu tlakových ztrát v prostoru fotobioreaktoru pomocí měření tlakové diference proudícího média mezi vstupním a výstupním hrdlem fotobioreaktoru. Vytvořit CFD model skutečného fotobioreaktoru a na základě porovnání naměřených a numerickou metodou vypočtených hodnot tlakových ztrát CFD model validovat. Deskový fotobioreaktor a validovaný CFD model budou sloužit pro další vědecké účely v oblasti kultivace mikrořas.

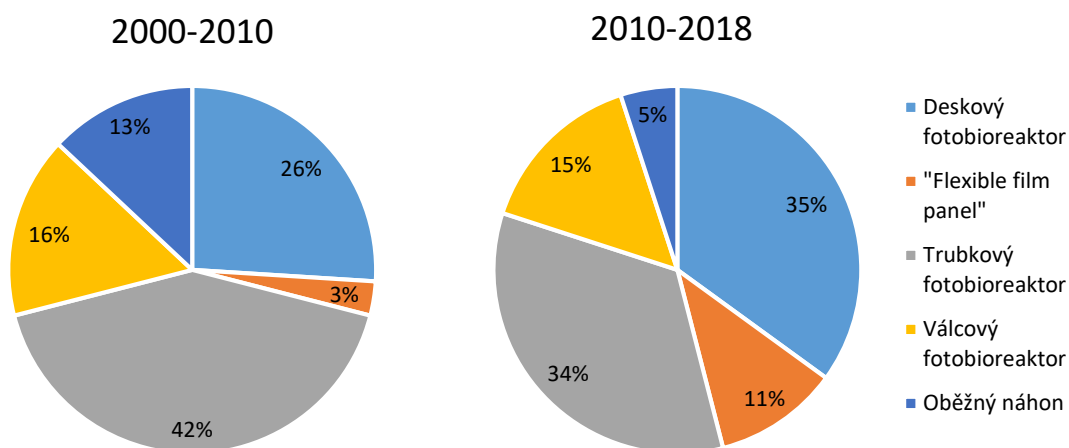
## 2 Deskový fotobioreaktor

Deskový fotobioreaktor je v současnosti považován za nejvhodnější zařízení pro pěstování mikrořas. V porovnání s ostatními typy fotobioreaktorů mají deskové fotobioreaktory nejvyšší teoretickou výtěžnost řas na zastavěnou plochu, viz obrázek 2.1. Teoretický výpočet uvažuje s tím, že efektivní růst mikrořas probíhá pouze v prosvětlené části média, tj. do hloubky 5 cm od stěny nebo hladiny, a že je ve všech systémech denní produkce 1 g řas na 1 litr kultivačního média (Bělohav et al., 2017).



Obrázek 2.1 Teoretická produkce řas na jeden hektar (Bělohav et al., 2017)

Deskovým fotobioreaktorům je v posledních letech věnována stále větší pozornost, viz obrázek 2.2. Odtud je vidět, že procentuální zastoupení patentů, věnujících se deskovým fotobioreaktorům spolu s pytlými deskovými fotobioreaktory neboli „flexible film panel“, výrazně stoupá na úkor otevřených náhonů a trubkových fotobioreaktorů, kterým byla věnována velká pozornost v minulosti.



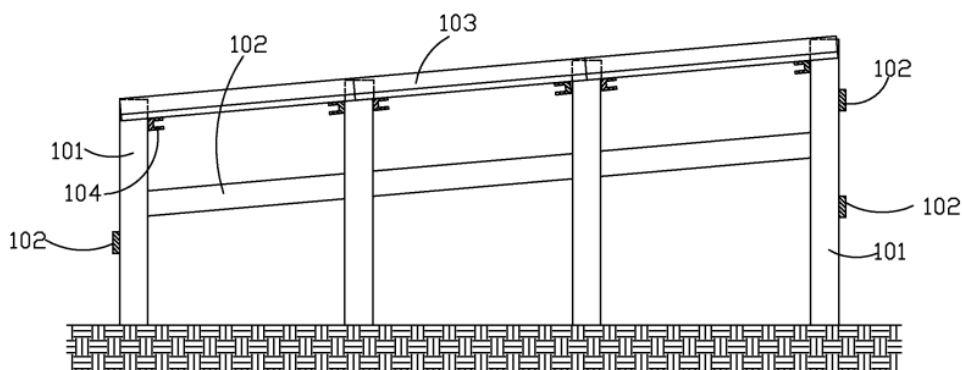
Obrázek 2.2 Vybrané typy fotobioreaktorů v nových patentech (Žáková et al., 2018)

## 2.1 Patentová rešerše

Nejdůležitější patenty v oblasti deskových fotobioreaktorů posledních let:

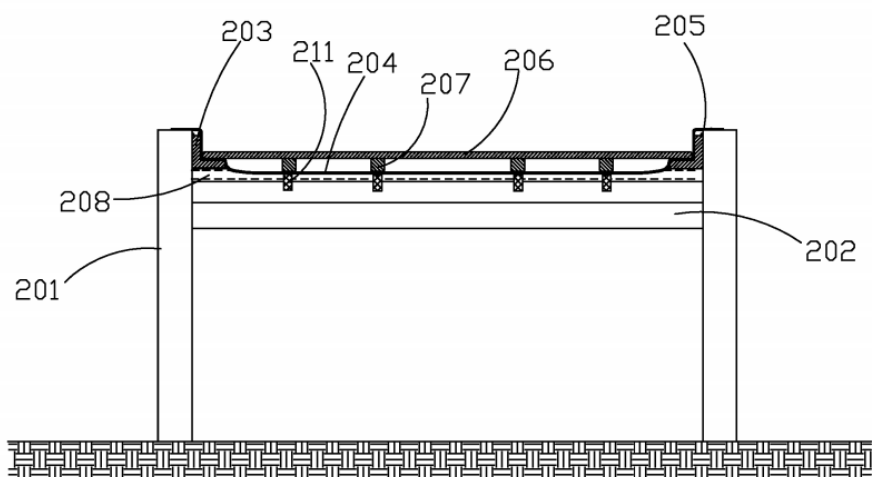
- 1) LEVIN, Alexander. *Photobioreactor*. United States. Patent Application Publication. US 2014/0093950 A1. děleno 3.4.2014. Zapsáno 3.10.2012.

Tento patent se týká fotobioreaktorů pro kultivaci mikrořas. Hlavními překážkami pro kultivaci mikrořas jsou distribuce světla do zpracovávaného média, promíchávání živin do média, odstraňování vygenerovaného kyslíku, dodávání dostatečného množství oxidu uhličitého a udržování optimální teploty. Zařízení je popsáno jako horizontální fotobioreaktor s uzavřeným kultivačním prostorem ve formě tenké vrstvy média, která je osvětlena slunečním zářením. Spodní část fotobioreaktoru je tvořena pružnou membránou a vrchní část tvoří pevná světlopropustná deska, pružná membrána je po stranách spojena s pevnou průsvitnou deskou pro uzavření prostoru, viz obrázek 2.4. Celé zařízení je mírně nakloněno,  $0,1^\circ - 2^\circ$ , pro zajištění proudění média fotobioreaktorem, viz obrázek 2.3. Průsvitná deska je podepřena podélnými roztečnými podpěrami, prostor fotobioreaktoru je tak rozdělen na několik segmentů. Zpracovávané médium prochází fotobioreaktorem proti proudu plynů. Přívod a odvod média a plynů je zajištěno pomocí nádrží před a za reaktorem, obrázek 2.5 (Levin, 2014).



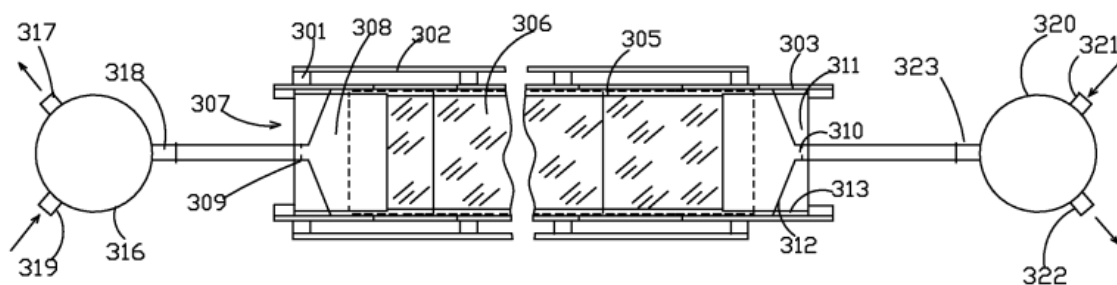
Obrázek 2.3 Boční pohled, podpěrné profily instalované na sloupcupcích (Levin, 2014)

101 – sloupek, 102 – příčná tyč sloupků; 103 – podpěrný profil; 104 – příčná kanálová tyč (Levin, 2014)



Obrázek 2.4 Průřez fotobioreaktorem (Levin, 2014)

201 – sloupek; 202 – příčná tyč sloupků; 203 – podpěrný profil; 204 – pružná membrána; 205 – podélná podpěra; 206 – skleněná deska; 207 – podélná roztečná podpěra; 208 – příčná tyč kanálu; pozn. podélné roztečné podpěry (207) jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu (Levin, 2014)



Obrázek 2.5 Vrchní pohled (Levin, 2014)

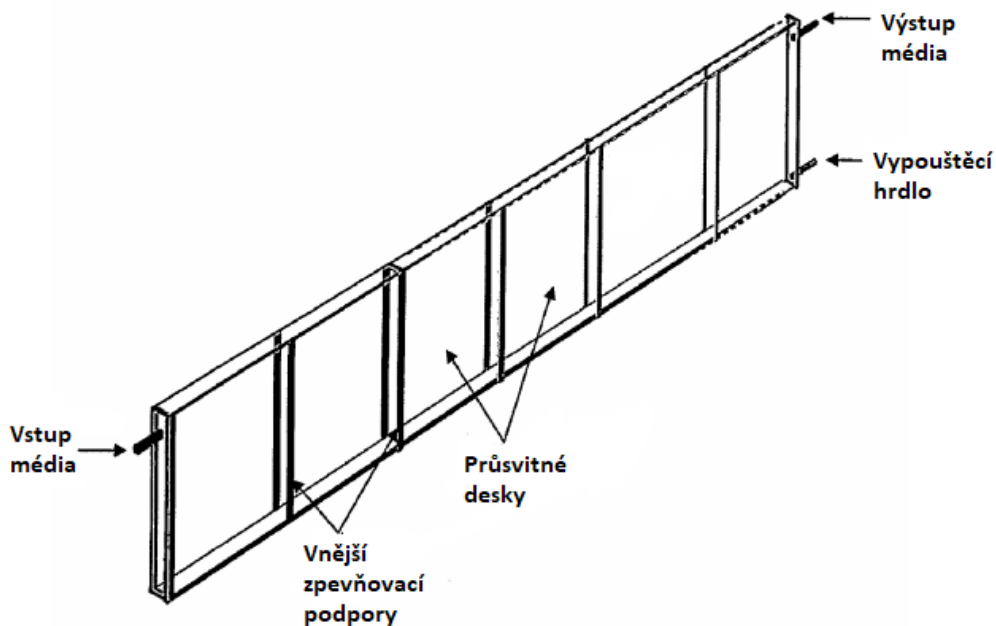
301 – sloupek; 302 – příčná tyč sloupků; 303 – podpěrný profil; 305 – podélná podpěra; 306 – skleněná deska; 307 – hrdlo; 308 – neprůhledná deska; 316 a 320 – nádoba; 317 – odvod plynů; 319 – přívod média; 321 – přívod plynů; 322 – odvod média (Levin, 2014)

- 2) HU, Qiang a Milton SUMMERFELD. *Photobioreactor and uses therefor*. United States. Patent Application Publication. US 2010/0028976 A1. Uděleno 4.2.2010. Zapsáno 20.2.2007.

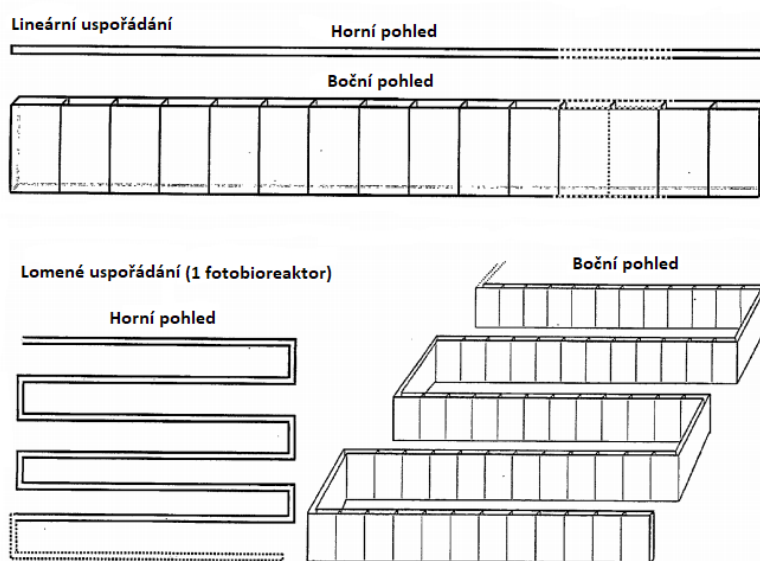
Patent popisuje deskový vertikální fotobioreaktor, který by měl sloužit pro efektivní pěstování mikrořas. Autoři se odkazují na dříve uvedené trubkové fotobioreaktory, které mají z konstrukčních důvodů velký podíl neosvícených úseků, 10–15 % objemu. Dalším problémem trubkových reaktorů je obtížné odvádění kyslíku, který vzniká fotosyntézou a který inhibuje průběh fotosyntézy. Dále autoři uvádějí jako velkou nevýhodu trubkových fotobioreaktorů nutnost zařazení mechanických čerpadel do oběhu pro zajištění cirkulace média. Při průchodu čerpadlem jsou ale buňky mikrořas vystaveny velkému smykovému napětí, které vede k jejich degradaci. Z toho důvodu je v trubkových fotobioreaktorech možné pěstovat jen takové druhy mikrořas, které jsou odolné vysokému smykovému napětí. Deskové fotobioreaktory by měly být řešením výše uvedených problémů.

Konstrukce fotobioreaktorů může být provedena tak, aby nevznikala žádná temná místa při kultivaci média. Proudění a promíchávání média může být provedeno pomocí spodní aerace, což způsobuje jen minimální napětí na buňky mikrořas. Nízká výška deskových fotobioreaktorů, 1-3 m, eliminuje problém vysoké koncentrace generovaného kyslíku (Hu a Summerfeld, 2010).

Autoři patentu představují různé možnosti uspořádání fotobioreaktorů, vybrané z nich viz obrázek 2.7. Základem je obecná geometrie, viz obrázek 2.6, jde o libovolně dlouhou komoru tvořenou z průhledných desek, do které na jedné straně vstupuje zpracovávané médium a na druhé straně vystupuje produkt (Hu a Summerfeld, 2010).



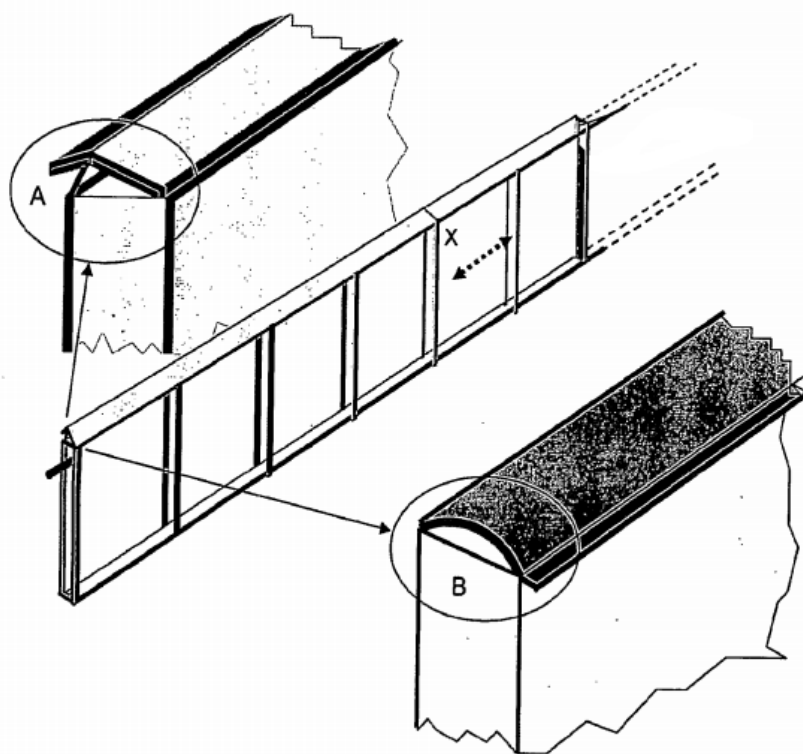
Obrázek 2.6 Přípojná místa fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010)



Obrázek 2.7 Příklad geometrického uspořádání (Hu a Summerfeld, 2010)

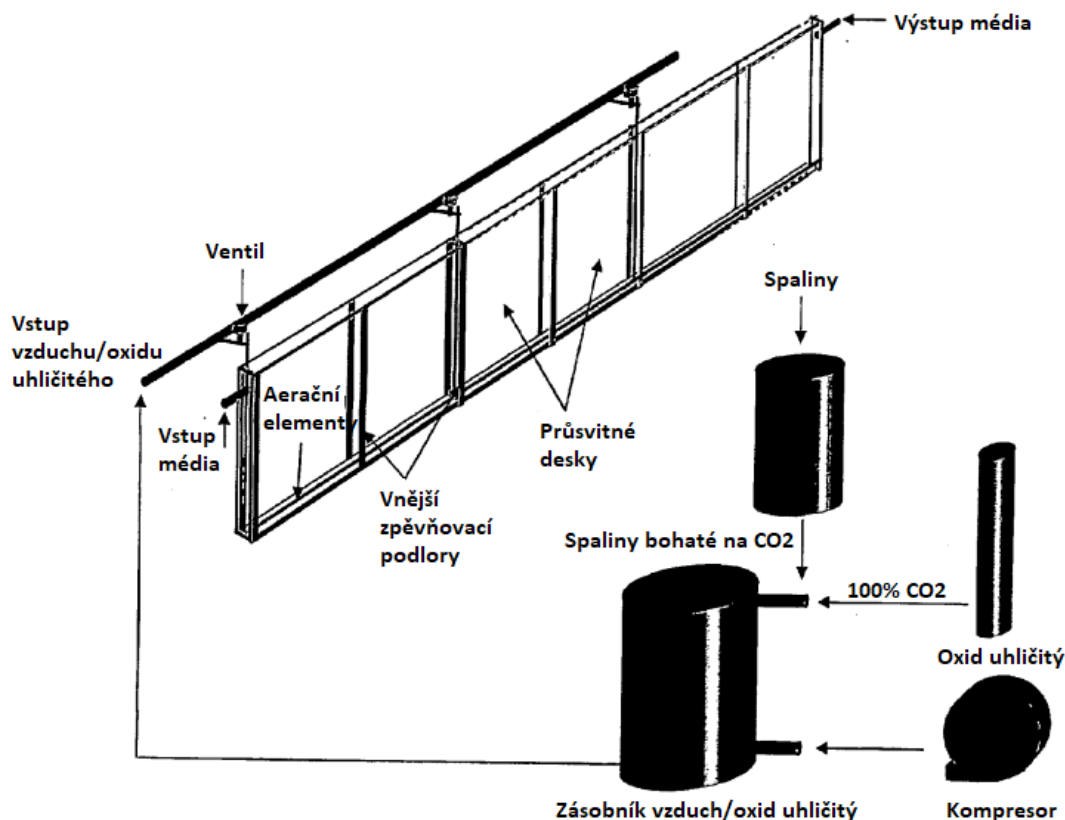
Tloušťka fotobioreaktoru závisí na propustnosti světla zpracovávaným médiem. Je uvedeno, že tloušťka by měla být mezi 5–400 mm a ideální tloušťka je mezi 20–100 mm. Výška fotobioreaktoru může být teoreticky libovolná. S výškou zařízení se ale odvíjí tloušťka stěn pro schopnost udržet hydrostatický tlak, čímž se zařízení prodražuje kvůli vyšší ceně materiálu. Příliš nízké zařízení naopak znamená menší průtok zpracovávaného média, což vede k nutnosti využití více fotobioreaktorových jednotek a tedy více propojovacích prvků, ventilů a zařízení pro kontrolu média (Hu a Summerfeld, 2010).

Vrchní část fotobioreaktoru je řešena viz obrázek 2.8. Vrchní část fotobioreaktoru musí umožnit volné unikání vyprodukovaného kyslíku, zároveň ale musí zabránit vstupu prachu a mikroorganismů z venkovního prostředí a musí bránit vypařování vody z fotobioreaktoru. Vrchní část by měla být snadno odnímatelná, aby bylo možné prostor fotobioreaktoru v případě potřeby vyčistit (Hu a Summerfeld, 2010).



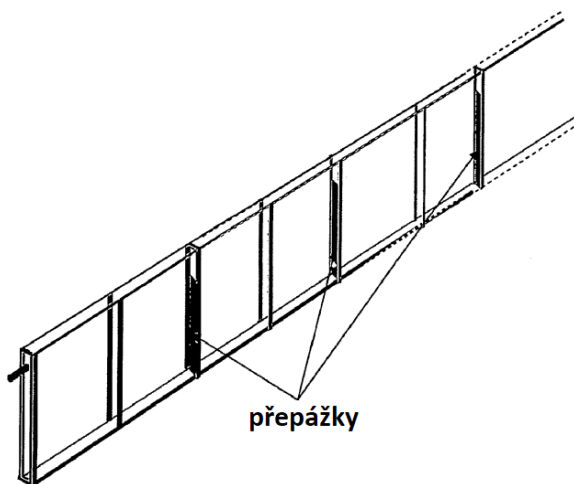
Obrázek 2.8 Řešení vrchní části fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010)

Dodávání oxidu uhličitého a aerace je řešena probubláváním média odspodu nádrže, viz obrázek 2.9. Jako aerační elementy mohou být použity plastové nebo ocelové trubky s vyvrtanými otvory o průměru 0,1-2 mm s roztečí 10-50 mm. Jako aerační médium mohou sloužit spaliny bohaté na oxid uhličitý nebo o oxid uhličitý obohacený vzduch. Koncentrace  $\text{CO}_2$  by měla být 0.1-20 % obj., v závislosti na druhu pěstovaných mikrořas. Pokud by byl fotobioreaktor vyšší než 1,8 m, doporučuje se použít další rozvod aeračního média v prostoru nádrže (Hu a Summerfeld, 2010).



Obrázek 2.9 Aerace fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010)

Pro získání požadovaného proudění a doby zdržení ve fotobioreaktoru mohou být do nádrže instalovány přepážky, viz obrázek 2.10. Přepážky jsou vysoké zhruba 60-80 % výšky fotobioreaktoru a mají kromě úpravy proudění i bezpečnostní funkci zadržení části média v jednotlivých segmentech nádrže v případě, že v některém ze segmentů dojde k poruše stěny. Pokud je požadováno, aby médium proudilo kolem přepážky i u dna nádoby, je doporučeno použít solenoidový ventil, který se automaticky uzavře v případě nehody (Hu a Summerfeld, 2010).

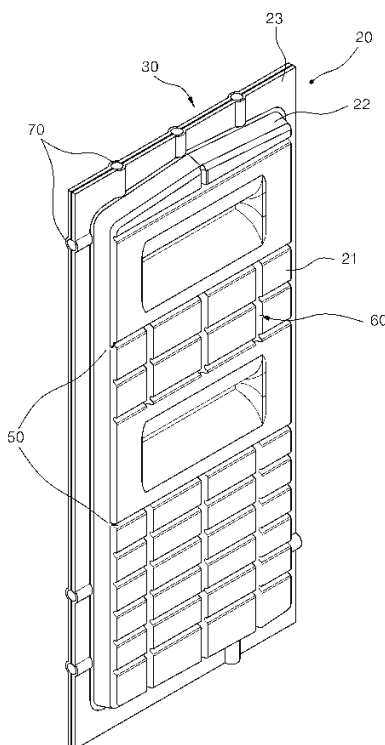


Obrázek 2.10 Fotobioreaktor, přepážky (Hu a Summerfeld, 2010)



- 3) AHN, Dong Gyu, Yeong Su AHN, Sanghwa CHUNG, Jong Rak BAK, Jeongu BAK a Jongtae KIM. *Flat panel photobioreactor with high rigidity and multiple light reflector*. Republic of Korea. KR 101207475 B1. Uděleno 3.12.2012.

Autoři popisují vertikální deskový fotobioreaktor, který díky struktuře světlopropustných stěn, viz obrázek 2.11, dokáže do proudícího média dopravit více světla a je více odolný na hydrostatický přetlak od kultivovaného média než klasický deskový fotobioreaktor s hladkou stěnou.



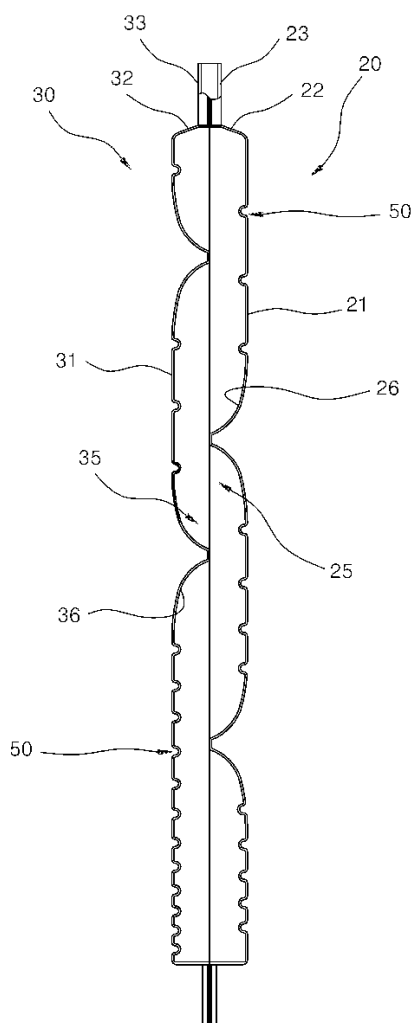
**Obrázek 2.11** Struktura stěny fotobioreaktoru (Ahn et al., 2012)

20(30) – deska fotobioreaktoru; 21(31) – rovná část; 22(32) – ohnutá část; 23(33) – spojovací část; 50 – horizontální zpevnění; 60 – vertikální zpevnění; 70 – připojovací místa (Ahn et al., 2012)

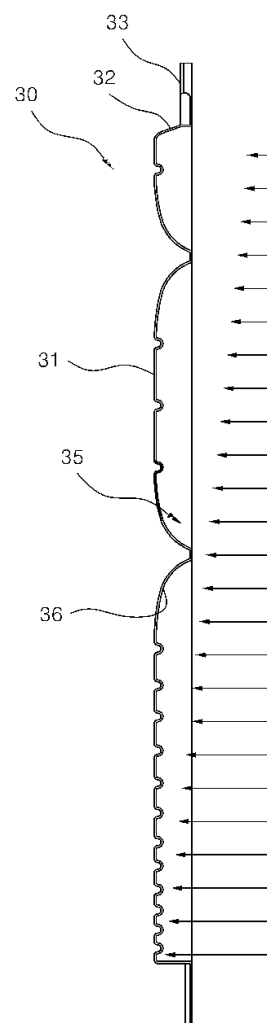
Pohled v řezu, viz obrázek 2.12, zobrazuje řešení světlopropustných stěn, které ovlivňuje proudění ve fotobioreaktoru. Jak je vidět na obrázku, desky v prostoru fotobioreaktoru vytvářejí meandry, které přispívají k promíchávání média proudícího fotobioreaktorem směrem dolů. To přispívá k lepšímu prozáření kultivovaného média a zároveň k lepší homogenizaci. Kromě těchto velkých průhybů vytvářejících meandry je na stěně fotobioreaktoru možné nalézt ještě menší horizontální i vertikální průhyby, které se starají o zpevnění desky. Rozmístění horizontálních meandrů, viz obrázek 2.13, je závislé na velikosti hydrostatického přetlaku v dané oblasti nádrže. Pro hydrostatický tlak platí:

$$p = \rho gh \quad (2.1)$$

kde  $\rho$  je hustota média [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m s}^{-2}$ ] a  $h$  je výška vodního sloupce [m]. Odtud je tedy patrné, že počet elementů pro horizontální zpevnění desky přibývá lineárně řadou od horní části zařízení (Ahn et al., 2012).



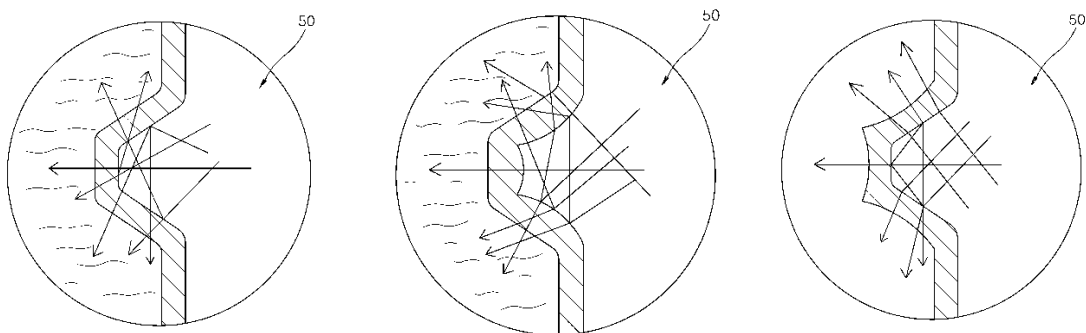
**Obrázek 2.12 Řez fotobioreaktorem, struktura stěn (Ahn et al., 2012)**



**Obrázek 2.13 Řez fotobioreaktorem, hydrostatický přetlak (Ahn et al., 2012)**

20(30) – deska fotobioreaktoru; 21(31) – rovná část; 22(32) – ohnutá část; 23(33) – spojovací část; 25(35) – generátor vírů; 26(36) – průhyb; 50 – horizontální zpevnění; 60 – vertikální zpevnění; 70 – připojovací místa (Ahn et al., 2012)

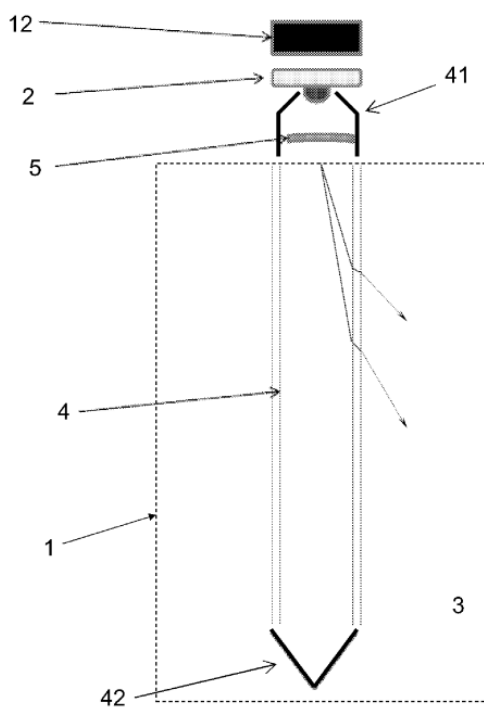
Kromě zpevnění desky fotobioreaktoru slouží horizontální a vertikální elementy uvedené výše také k dalšímu zefektivnění prosvětlení média. Různé geometrie ohnuté části stěny mají různý vliv na lom světla, viz obrázek 2.14. Autoři uvádějí, že pro výrobu desek tohoto zařízení je nejvhodnější světlopropustný polykarbonát o tloušťce 3 – 4,5 mm, dle velikosti zařízení. Vzdálenost elementů pro horizontální zpevnění by měla být okolo 60 mm v dolní oblasti fotobioreaktoru a 100 mm v horní oblasti (Ahn et al., 2012).



Obrázek 2.14 Lom světla deskou fotobioreaktoru (Ahn et al., 2012)

- 4) FRIEDERICH, Alain, Michael CONIN, Gael RUIZ a Mahmoud AFFI. Photobioreactor in a closed environment for the culture of photosynthetic microorganisms. United States. Patent Application Publication. US 2017/0101611 A1. Uděleno 13.4.2017. Zapsáno 16.12.2016.

Tento patent se týká osvětlení prostoru fotobioreaktorů, viz obrázek 2.15. Obecně se jedná o trubku kruhového průřezu vyrobenou ze světlopropustného materiálu, polymethylmethakrylátu (PMMA), na jejímž konci je umístěný světelný zdroj. Povrch trubky je zdrsňen pro lepší difuzi světla. Jako zdroj světla slouží světlo emitující diody (LED). Opačný konec trubky, než je umístěný světelný zdroj, je opatřen zrcadlem (Friederich et al., 2017).



Obrázek 2.15 Další způsob osvětlení fotobioreaktoru (Friederich et al., 2017)

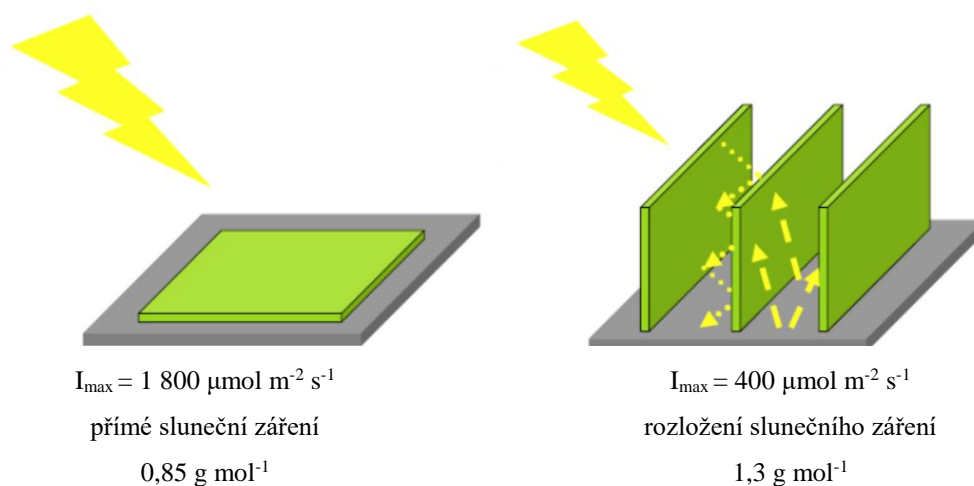
1 – uzavřený fotobioreaktor; 2 – světelný zdroj umístěný vně fotobioreaktoru; 3 – kultivované médium; 4 – válcový (hranolový) difuzní element; 5 – čočka; 12 – chladicí systém; 41 – optická část zařízení (Friederich et al., 2017)

Použité světlo emitující diody mají elektrický výkon 10 W. Předpokládá se, že jedna LED prozáří zhruba 1 litr média. Vlnová délka světla je 650 nm. Penetrační hloubka použitého světla je

uvažována  $\lambda = 3,8$  mm, pro koncentraci  $10^8$  buněk na ml média. Výhodou tohoto řešení, je že zdroj světla je mimo prostor fotobioreaktoru, lze tedy lépe kontrolovat teplotu světelných zdrojů, není potřeba izolovat elektrické prvky proti vniku kapaliny a v prostoru reaktoru nevznikají temná místa, která by jinak byla způsobena samotným světelným zdrojem (Friederich et al, 2017).

## 2.2 Konstrukční řešení deskových fotobioreaktorů

Z patentů uvedených výše je patrné, že hlavním problémem fotobioreaktorů je zajistit dostatečné osvětlení zpracovávaného média v prostoru fotobioreaktoru, mít dostatečný přísun kultivačních plynů a odvod generovaného kyslíku a mít pro mikrořasy zajištěné prostředí, ve kterém nebudou vystaveny příliš vysokému smykovému napětí, které by způsobilo porušení jejich buněčných struktur, zároveň ale musí být smykové napětí dostatečně vysoké, aby nedocházelo k usazování mikrořas na stěny fotobioreaktoru. Až na jeden případ se jedná o vertikálně orientované deskové fotobioreaktory. Cuaresma et al. (2011) se ve své práci věnuje problematice, zdali je efektivnější použít horizontální nebo vertikální uspořádání fotobioreaktorů. Měření bylo prováděno ve Španělsku a bylo zjištěno, že během poledne je velikost PPF (Photosynthetic Photon Flux Density) neboli hustota toku fotosyntetických fotonů pro vertikální uspořádání fotobioreaktorů  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a pro horizontální  $1\,800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Nejvyšší výtěžnosti bylo dosaženo ve fotobioreaktoru s horizontálním uspořádáním, v jednom kilogramu média byly za jeden den vyprodukovány čtyři gramy mikrořas. Nejvyšší efektivita využití dodaného slunečního záření bylo dosaženo u vertikálně orientovaných fotobioreaktorů, kde z jednoho molu fotosynteticky aktivních fotonů vzniklo 1,3 g biomasy. Pro porovnání v případě horizontálně orientovaných fotobioreaktorů to bylo pouze 0,85 g biomasy na mol fotosynteticky aktivních fotonů. Nejvyšší teoretickou výtěžnost pak autor uvádí jako 1,8 g biomasy na mol fotosynteticky aktivních fotonů. Z důvodů vyššího využití dopadajícího světla a lepšího využití zastavěné plochy se tedy doporučuje využití vertikálně orientovaných fotobioreaktorů (Cuaresma et al., 2011), viz obrázek 2.16.



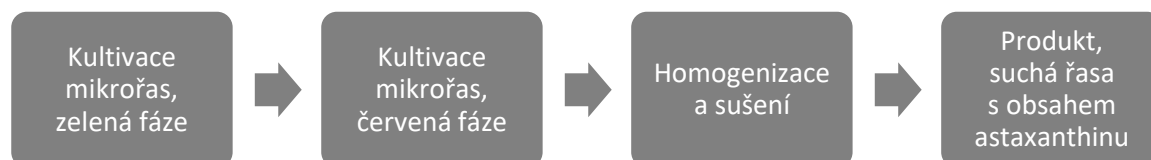
Obrázek 2.16 Vliv orientace deskových fotobioreaktorů (Bosma et al., 2012)

Problematice smykového napětí se věnují Wang a Lan (2018). Zmiňují negativní vliv smykového napětí na buňky mikrořas vlivem proudění média fotobioreaktorem a vlivem míchání. Obratem ale uvádějí, že určité smykové napětí na stěně fotobioreaktoru je nutné pro prevenci usazování buněk mikrořas. Citlivost buněk mikrořas na smykové napětí je různá. Například mikrořasy *Isochrysis galbana*, *Skeletonema constantum* nebo *Callitris muelleri* jsou náchylné na smykové napětí již mezi 1,2 až 5,4 Pa, oproti tomu *Tetraselmis suecica* odolá smykovému napětí až 80 Pa a je vhodná i pro fotobioreaktory, ve kterých je médium dopravováno centrifugovým čerpadlem (Michaels et al., 2015). Velikost smykového napětí na stěnu pro zamezení usazování mikrořas se také různí dle druhu, obecně ale platí, že velikost smykového napětí by mělo být alespoň v řádu jednotek pascalů, proudění by mělo být turbulentní a při průtoku fotobioreaktorem by neměla vznikat hluchá místa a víry (Wang a Lan, 2018).

## 2.3 Deskové fotobioreaktory v průmyslu

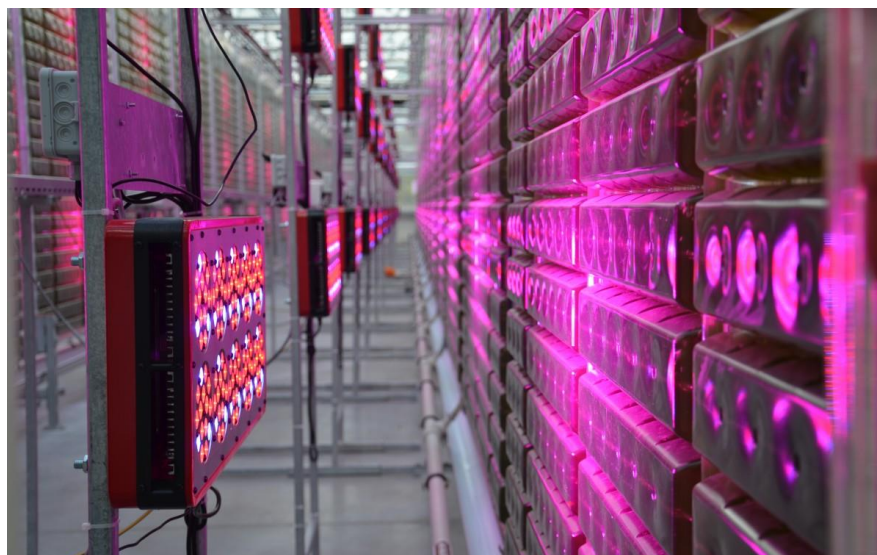
I přes intenzivní výzkum v oblasti uzavřených fotobioreaktorů je jejich využití v průmyslovém měřítku stále minimální. Hlavním aspektem, který brzdí masové využití fotobioreaktorů, je jejich cena. Dalším problémem jsou možnosti využití produktu, viz kapitola 1.3. Rentability může být dosaženo třemi základními způsoby. Snížení ceny zařízení, snížení energetických nákladů na výrobu, obzvláště na čerpání a sušení média, a výroba cennějších produktů.

Příkladem úspěšné produkce mikrořas pomocí deskových fotobioreaktorů je česká firma Bonaloka s.r.o., která pěstuje mikrořasy s vysokým obsahem přírodního barviva astaxanthinu. Proces výroby je následující:



Obrázek 2.17 Proces kultivace mikrořas, Bonaloka (Bonaloka, 2018)

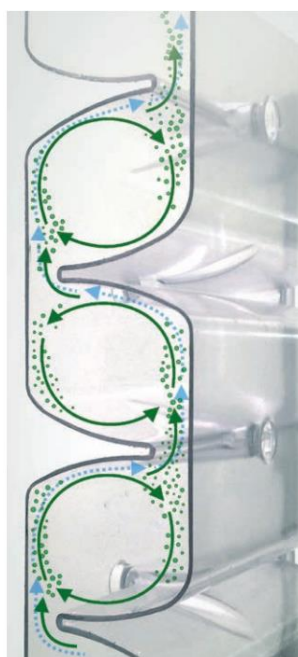
Ve fotobioreaktorech se kultivuje médium obsahující určité množství mikrořasy *Haematococcus pluvalis* (Banaloka, 2018). Jedná se o druh sladkovodní mikrořasy, který se vyznačuje tím, že v průběhu svého života mění svoji barvu ze zelené na červenou vlivem produkce přírodního barviva astaxanthinu. Ten se používá jako zdroj pigmentu v potravinářském průmyslu, lze ho použít pro lákavější zbarvení svaloviny při chovu lososů a pstruhů nebo k urychlení růstu okrasných tropických ryb. Tato látka má dále významné antioxidační účinky (Vávrová, 2015). Mikrořasy jsou kultivovány v deskových fotobioreaktorech s přisvětlením z umělého zdroje, viz obrázek 2.18.



Obrázek 2.18 Fotobioreaktor pro pěstování mikrořas, Bonaloka (Bonaloka, 2018)

Produktem výroby je suchá mikrořasa *Haemotococcus pluvalis*, která obsahuje 3 % astaxanthinu. Mikrořasa se dále může zpracovávat na další výrobky od doplňků stravy přes kosmetické produkty až po kvalitní krmiva pro zvířata (Bonaloka, 2018).

V provozu jsou použity fotobioreaktory od firmy Subitec s označením FPA180L. Jedná se o 180litrové fotobioreaktory, které jsou zapojeny do modulů. Celkový objem produkce je 130 000 litrů (Algae world news, 2017). Označení FPA znamená flat panel airlift, to značí, že cirkulace kultivovaného média fotobioreaktorem je prováděna pomocí aeračního plynu. Aerační plyn tvoří vzduch s nízkým obsahem oxidu uhličitého. Do prostoru fotobioreaktoru vstupuje vzduch ve spodní části speciální membránou a stoupá nádrží, čímž způsobuje proudění média prostorem fotobioreaktoru směrem vzhůru, viz obrázek 2.19 (Subitec, 2018).



Obrázek 2.19 Průřez fotobioreaktorem, Subitec (Subitec, 2018)

Z obrázku je dále vidět, že prostor fotobioreaktoru je rozdělen do několika vodorovných sekcí, proudění média mezi těmito sekcemi probíhá úzkým kanálem. Tento kanál umožňuje požadované proudění média a zároveň slouží k promíchávání jako statický směšovač. Tloušťka desky fotobioreaktoru je 50 mm. Jeden fotobioreaktor by měl být schopný produkce 500 g biomasy týdně (Subitec, 2018).

Design výše uvedeného fotobioreaktoru je patentován firmou Subitec. Aplikace těchto fotobioreaktorů pro průmyslové využití firmou Banaloka je v současné době stále ojedinělé. Firma Subitec tento typ fotobioreaktoru ve svém portfoliu uvádí jako zařízení pro laboratorní využití. Jejich nabídka dále čítá několik dalších fotobioreaktorů o objemu 6, 28 a 100 litrů, stejné konstrukce (Subitec, 2018).

## **2.4 Vlastní doporučení při konstrukci uzavřených fotobioreaktorů**

V současné době preferované deskové fotobioreaktory mají potenciál hromadného rozšíření pro ekonomicky rentabilní kultivaci mikrořas. Z patentů, výzkumů a aplikací výše je patrné, že deskové fotobioreaktory by měly mít vertikální orientaci pro lepší využití zastavěné plochy, lepší využití dopadajícího světla při využití slunečního záření, pro lepší přívod kultivačních plynů a odvod vznikajícího oxidu uhličitého. Deskové fotobioreaktory jsou tenké, relativně široké a vysoké nádrže na vodu, vyrobené ze světlopropustných materiálů, například skla nebo častěji polymethylmetakrylátu. Vodní sloupec v nádrži může být vysoký dva i více metrů, vzniká tak hydrostatický tlak v řádu desítek kPa, který působí na stěny a dno fotobioreaktoru. Pevnostní vlastnosti polymethylmetakrylátu jsou v porovnání s běžně používanými konstrukčními materiály velmi nízké, mez kluzu v tahu pro PMMA desky je 48,9 MPa a mez pevnosti v tahu je 79,8 MPa. U nádrží větších rozměrů je nutné použití podpěrných prvků, které způsobí lepší rozložení napětí od hydrostatického tlaku na stěnu fotobioreaktoru. Lze použít vnitřního zpevnění, kdy se na vnitřní stěnu průhledných desek nádrže nalepí vyztužovací prvky, viz obrázek 2.20. Nevýhodou tohoto řešení je, že vyztužovací prvky ovlivňují proudění média v nádrži. Při vhodném návrhu toho ale lze naopak využít pro usměrnění proudění v určitých oblastech fotobioreaktoru.



Obrázek 2.20 Příklad vnitřních vyztužovacích prvků (Syndebio, 2018)

Další možností je stěnu fotobioreaktoru zpevnit z vnější strany pomocí vnějšího rámu, viz obrázek 2.21. Tento rám ale částečně zastíní desku fotobioreaktoru a sníží tím účinnost fotobioreaktoru. Na druhou stranu, oproti předchozímu řešení nedochází k zásahu do prostoru fotobioreaktoru a charakter proudění média v prostoru nádrže není ovlivněn.



Obrázek 2.21 Příklad vnějších vyztužovacích prvků (Doga limited, 2018)

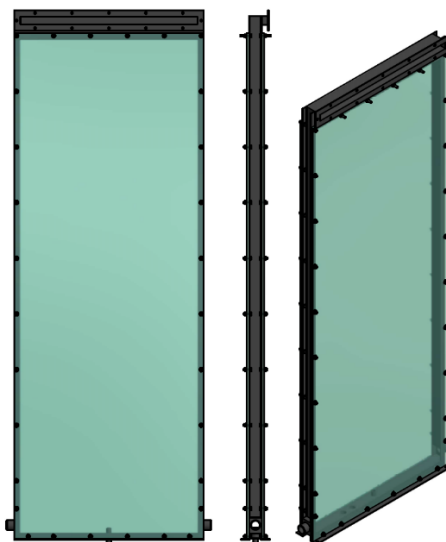
Třetí možností je použít speciálně tvarované průhledné desky, viz výše fotobioreaktor firmy Subitec aplikovaný pro kultivaci mikrořas firmou Bonaloka, nebo deskový fotobioreaktor uvedený v patentu číslo 3 Ahn et al. (2012). Výhodou tohoto řešení je, že není nutné používat žádné dodatečné externí ani interní výtuhy, jelikož tvarování desek zajistí požadované zpevnění. Zároveň při vhodném návrhu tvaru desek mohou jednotlivé segmenty požadovaným způsobem ovlivňovat



charakter proudění média v nádrži, zúžení mohou například fungovat jako statické směšovače. Toto řešení je vhodné pro komerční fotobioreaktory s předpokladem sériové výroby, kdy se vyplatí investice do forem potřebných k výrobě požadovaného tvaru průhledných desek a kde není nutné zasahovat do charakteru proudění média v nádrži. Pro laboratorní a testovací účely se takové řešení nehodí.

### 3 Konstrukce fotobioreaktoru

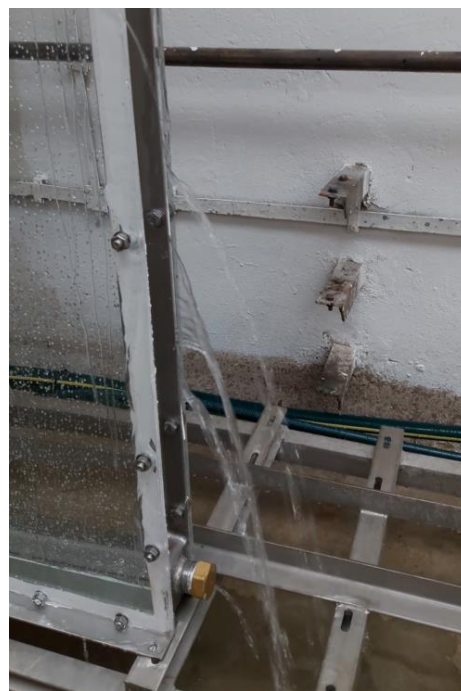
Tématem praktické části této práce je návrh vhodné konstrukce deskového fotobioreaktoru, který nahradí stávající konstrukčně nevyhovující fotobioreaktor, viz obrázek 3.1. Při stávající konstrukci byl chybně proveden pevnostní výpočet stěn fotobioreaktoru, viz níže kapitola 3.1, vyrobených z 10 mm tlustých PMMA desek a po napuštění prostoru nádrže vodou došlo k popraskání průhledných desek, netěsnosti těsnících ploch a z toho důvodu k výtoku kapaliny z nádrže, viz obrázek 3.2 a obrázek 3.3.



Obrázek 3.1 Fotobioreaktor, původní návrh (vizualizace)



Obrázek 3.2 Fotobioreaktor, původní návrh, netěsnosti



Obrázek 3.3 Fotobioreaktor, původní návrh, netěsnosti

Zadáním bylo, aby nová verze fotobioreaktoru byla shodná s původním řešením, co se týče umístění a rozměrů přípojovacích prvků, protože celé zařízení je upevněno do rámu, který zůstane zachován. Dále musela být zachována tloušťka vodního sloupce ve fotobioreaktoru z důvodu ideálního prosvětlení mikrořas, viz předchozí kapitoly.

Hlavní nedostatky původního návrhu jsou:

- průhledné PMMA desky nejsou dimenzované na hydrostatický tlak, který na ně působí po naplnění prostoru vodou
- kvůli způsobu připevnění musely být PMMA desky provrtány, čímž vzniká výrazný vrub, který koncentruje napětí
- pro připevnění desek byly použity pouze standartní podložky, vzniká tak významné lokální namáhání PMMA desek
- jednotlivé prvky svařence rámu fotobioreaktoru byly vyrobeny z ohýbaného plechu, který byl z výroby nepravidelně zprohýbán, rám neumožňoval dostatečné utěsnění komory a sklo podtékalo
- krk příruby vstupního hrdla, obdélníková příruba ve vrchní části nádrže, je příliš krátký a neumožňuje dostatečný prostor pro montáž zařízení

Možné řešení problémů:

- použít silnější PMMA desky nebo průhledné desky z jiného pevnějšího materiálu
- místo provrtávání desek použít desky umístěné mezi příruby a zamezit tím vzniku vrubů
- v případě, že by desky byly provrtané, použít místo malých podložek lištu z plechu, která umožní lepší rozložení napětí
- pro jednotlivé prvky svařence rámu použít místo ohýbaného plechu normalizované profily, které zaručí rovný povrch pro utěsnění průhledných desek
- prodloužit krk příruby, čímž bude zajištěna snadnější montáž zařízení

### 3.1 Pevnostní kontrola původního návrhu

Výška vodního sloupce při plném napuštění fotobioreaktoru je 2040 mm, z rovnice:

$$p = \rho gh \quad (3.1)$$

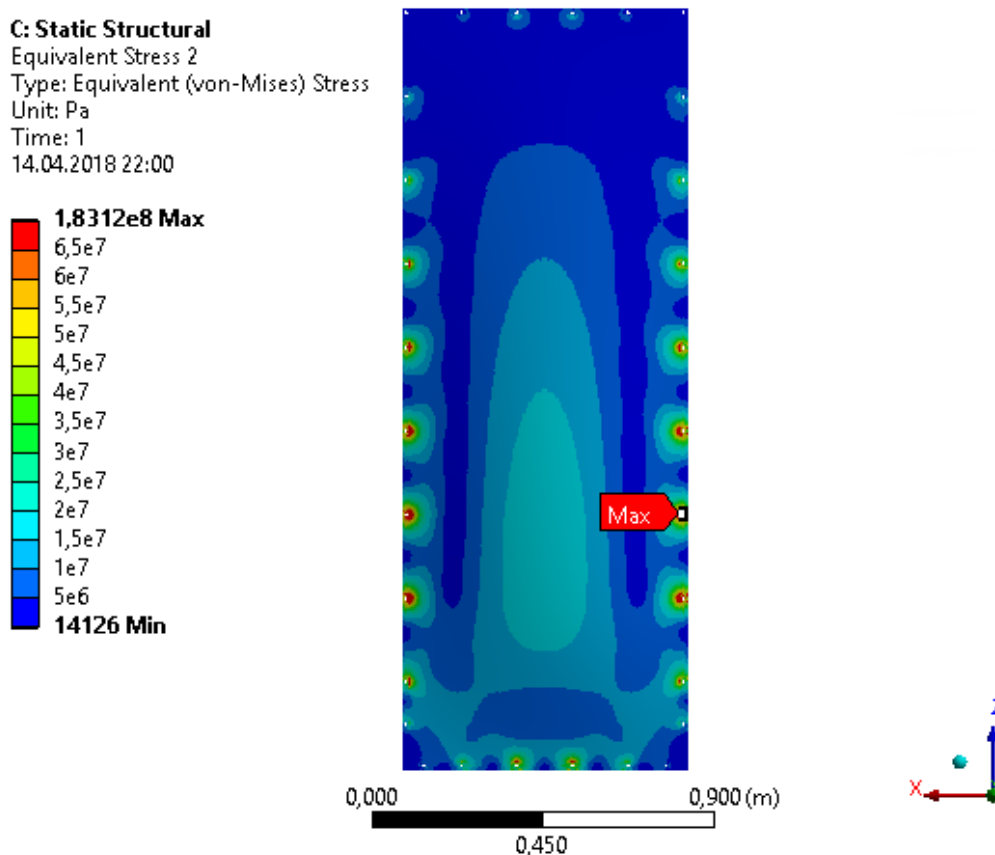
kde  $\rho$  je hustota média [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m s}^{-2}$ ] a  $h$  je výška vodního sloupce [m], lze stanovit tlak který působí na PMMA desky fotobioreaktoru. Průhledné desky začínají ve výšce 1975 mm nad dnem nádoby, resp. 65 mm pod hladinou, a končí 25 mm pod dnem nádoby.

Tabulka materiálů a fyzikální vlastnosti:

název	PMMA	1.4301	1.4125
použití	průhledné desky	svařenec rámu	spojovací materiál
měrná hmotnost	1 188 kg m <sup>-3</sup>	7 900 kg m <sup>-3</sup>	7 750 kg m <sup>-3</sup>
mez kluzu v tahu	48,9 MPa	230 MPa	689 MPa
mez pevnosti v tahu	79,8 MPa	540 MPa	861 MPa
Youngův modul	2,74 GPa	200 GPa	206 GPa
Poissonova konstanta	0,355	0,3	0,27
Modul pružnosti	1,01 GPa	76,9 GPa	81,4 GPa

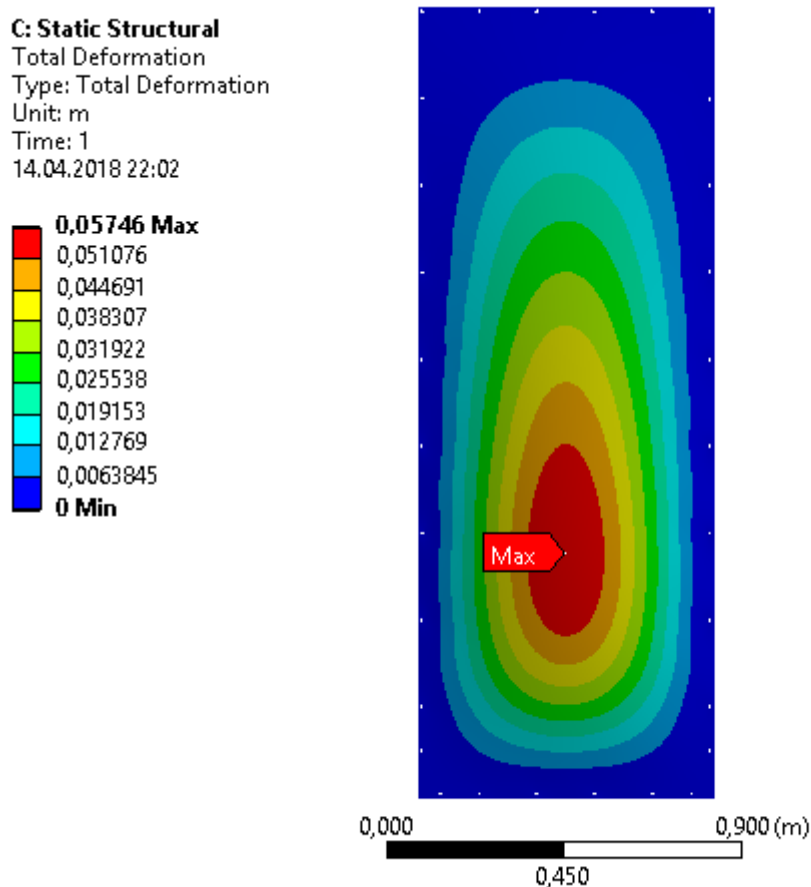
Tabulka 3.1 Fyzikální vlastnosti materiálů

Pro tyto parametry byla provedena pevnostní analýza v programu Ansys Static Structural, odkud maximální napětí na PMMA desku je 183 MPa. Nejvíce namáhané části jsou ve spodní třetině fotobioreaktoru, tj. v těžišti hydrostatické síly, v oblasti šroubů a dále ve středu desky, viz obrázek 3.4. Místa největšího namáhání odpovídají místům, kde PMMA deska začala praskat, od šroubů ve spodní třetině desky. Z porovnání maximálního napětí na desku a meze pevnosti daného materiálu je patrné, proč došlo k praskání desek. Z hlediska bezpečnosti je pro další návrhy uvažované maximální dovolené napětí na desku 25 MPa.



Obrázek 3.4 Pevnostní analýza původního návrhu (Ansys Static Structural)

U původního řešení bylo kromě praskání skla také pozorováno výrazné vydouvání průhledných desek vlivem působení vody. Dle analýzy až 57 mm, viz obrázek 3.5.

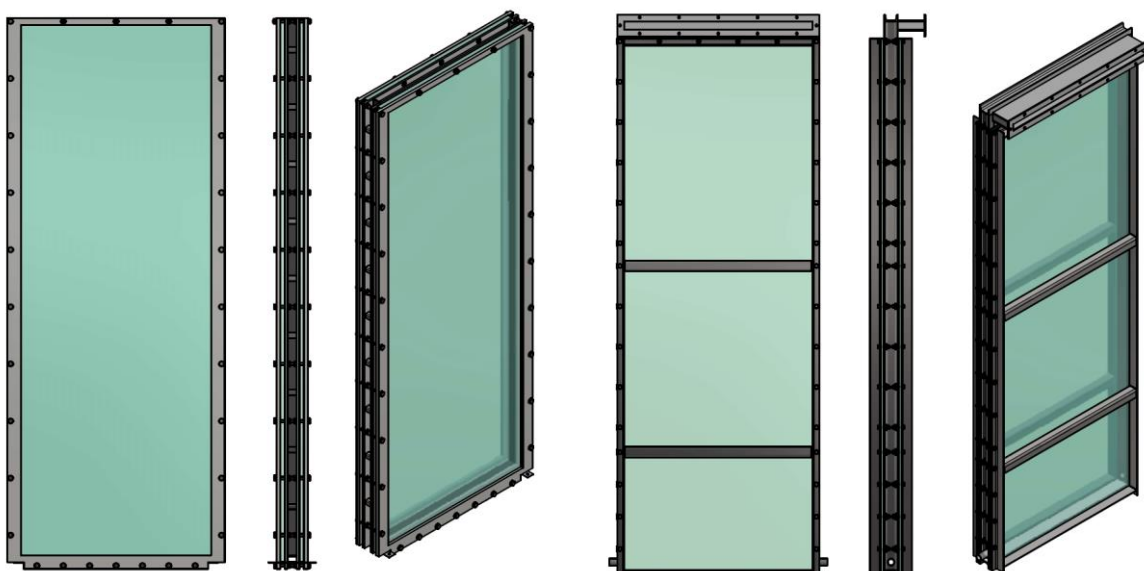


Obrázek 3.5 Deformační analýza původního návrhu (Ansys Static Structural)

Vyboulení PMMA desek vlivem vody sice z provozního hlediska nevádí, ale takto výrazné a okem viditelné vyboulení nepůsobí bezpečným dojmem. Proto by ho bylo dobré při návrzích eliminovat.

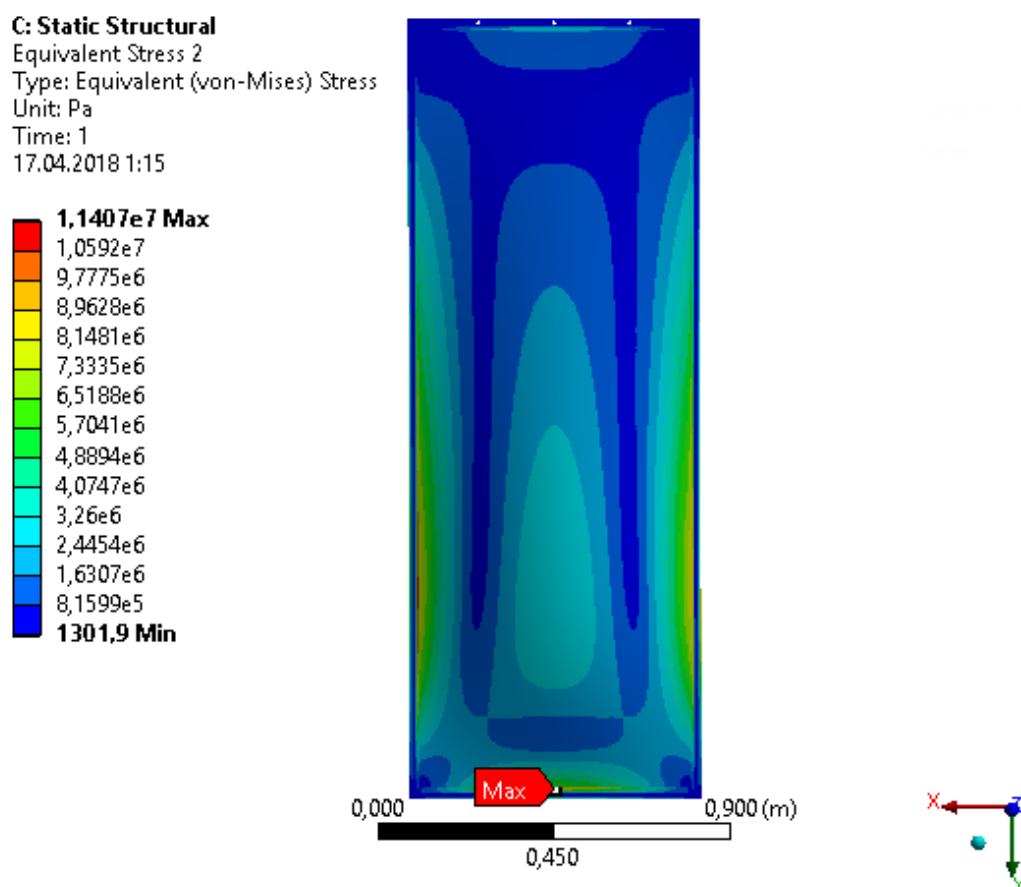
### 3.2 Návrhy na vylepšení a pevnostní analýza

Na základě poznatků uvedených v předchozí kapitole bylo navrženo několik možností. V této práci uvedu dvě hlavní řešení. Varianta A je použít silnější PMMA desky, 20 mm tlusté, které budou vsazeny mezi 2 příruby. Varianta B je použít stejné tloušťky PMMA desek, které budou provrtané jako v původním případě. Místo podložek pod šrouby bude použit rám z L profilů, který zaručí lepší rozložení síly na materiál. Pro zamezení vydouvání desek budou do rámu dále připevněny profily, které budou podepírat PMMA desky, bránit jejich vydouvání a poskytovat další rozložení síly. Nevýhodou tohoto návrhu je, že profily, které budou tvořit podporu desek, budou lokálně zastiňovat prostor fotobioreaktoru.



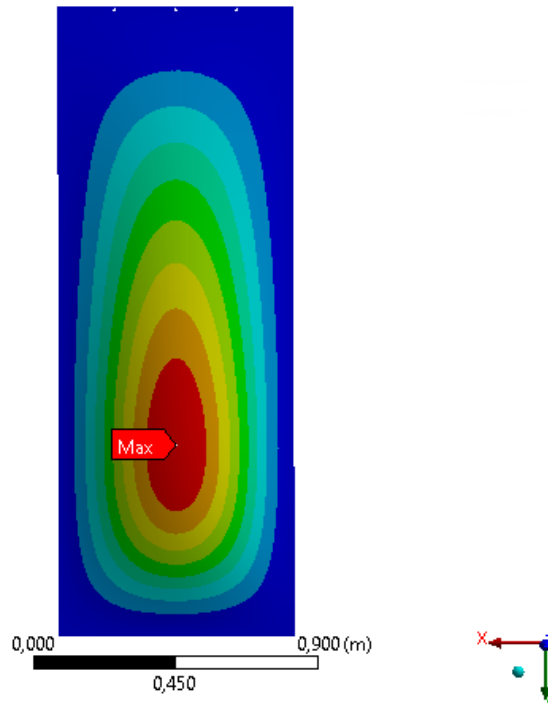
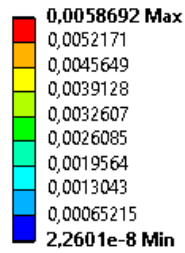
Obrázek 3.6 Varianta (A) - vlevo, varianta (B) - vpravo

Ze statické analýzy varianty A v programu Ansys Static Structural vyplývá, že maximální napětí, které působí na PMMA desku vlivem hydrostatického tlaku je 11,4 MPa, viz obrázek 3.7. Maximální vyboulení PMMA desky je 6 mm, viz obrázek 3.8.



Obrázek 3.7 Pevnostní analýza varianta (A) (Ansys Static Structural)

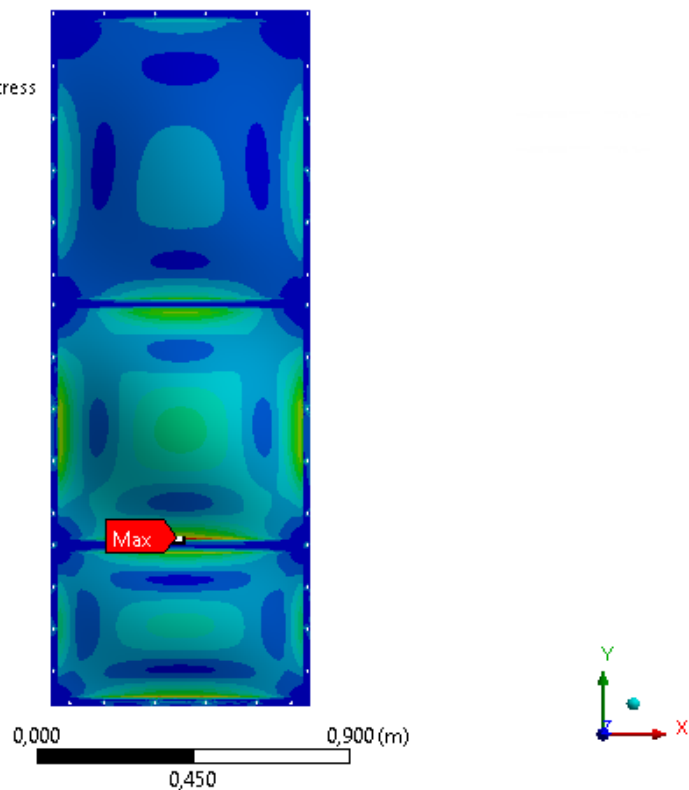
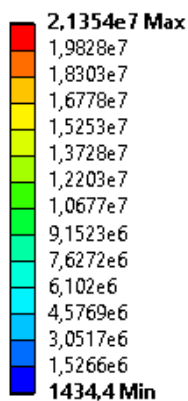
**C: Static Structural**  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1  
17.04.2018 1:16



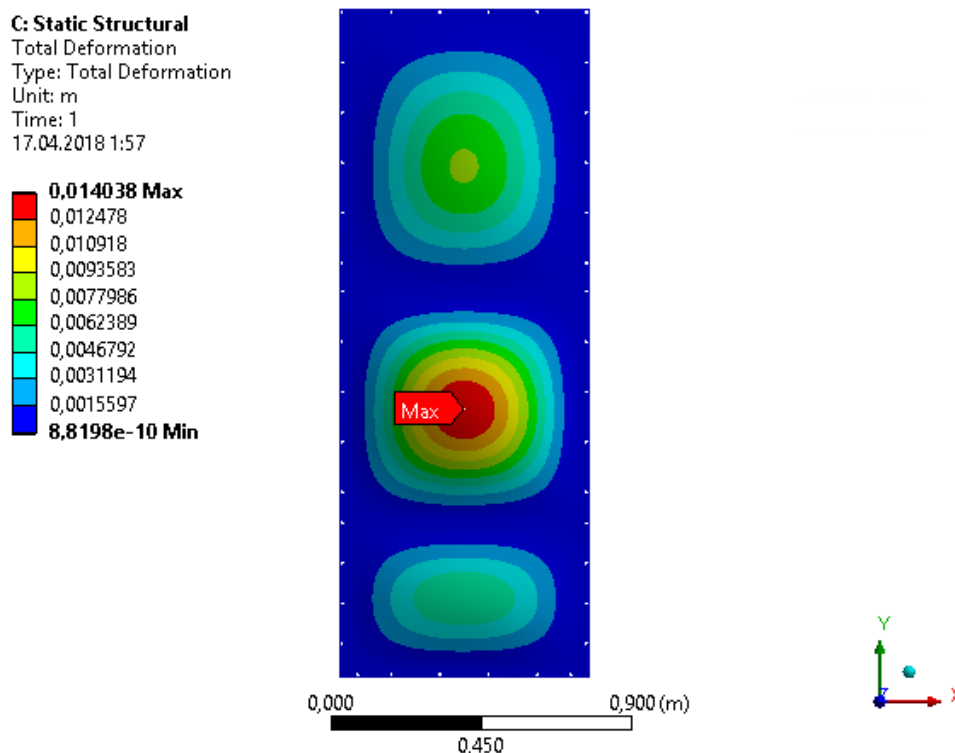
Obrázek 3.8 Deformační analýza varianta (A) (Ansys Static Structural)

U varianty B působí na PMMA desku, dle statické analýzy v programu Ansys Static Structural, maximální napětí 21 MPa, viz obrázek 3.9. Maximální vyboulení PMMA desky je 14 mm, viz obrázek 3.10.

**C: Static Structural**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1  
17.04.2018 1:58



Obrázek 3.9 Pevnostní analýza varianta (B) (Ansys Static Structural)



Obrázek 3.10 Deformační analýza varianta (B) (Ansys Static Structural)

Obě varianty řešení splňují pevnostní podmínku maximálního namáhání PMMA desky. Z provozního hlediska je vhodnější varianta A, kde jsou průhledné desky namáhané menším napětím, dochází k menšímu vyboulení, viz předchozí odstavce. Další výhodou varianty A oproti druhé variantě je 100% osvětlení průhledných desek. Velkou nevýhodou varianty A jsou výrazně vyšší pořizovací náklady, které jsou způsobené použitím silnějších PMMA desek (20 mm) a nutností přesné výroby přírub, kde jsou průhledné desky usazeny. Dále má varianta A výrazně vyšší hmotnost než druhé navrhované řešení (ca 200 kg vs. 100 kg), což by mohlo představovat komplikace s montáží a upevněním na rám, který není dimenzovaný na tak vysoké zatížení. Přehled výhod a nevýhod jednotlivých variant, viz tabulka:

	výhody	nevýhody
Varianta A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• menší napětí a průhyb</li> <li>• 100% osvětlení</li> <li>• snadnější demontáž PMMA desky pro přístup do komory</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyšší cena výroby</li> <li>• vyšší hmotnost</li> </ul>
Varianta B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• snadnější výroba, nižší cena</li> <li>• nižší hmotnost</li> <li>• snadnější manipulace a montáž</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• výztuhy zastiňují část průhledných desek, snižují efektivitu osvětlení</li> </ul>

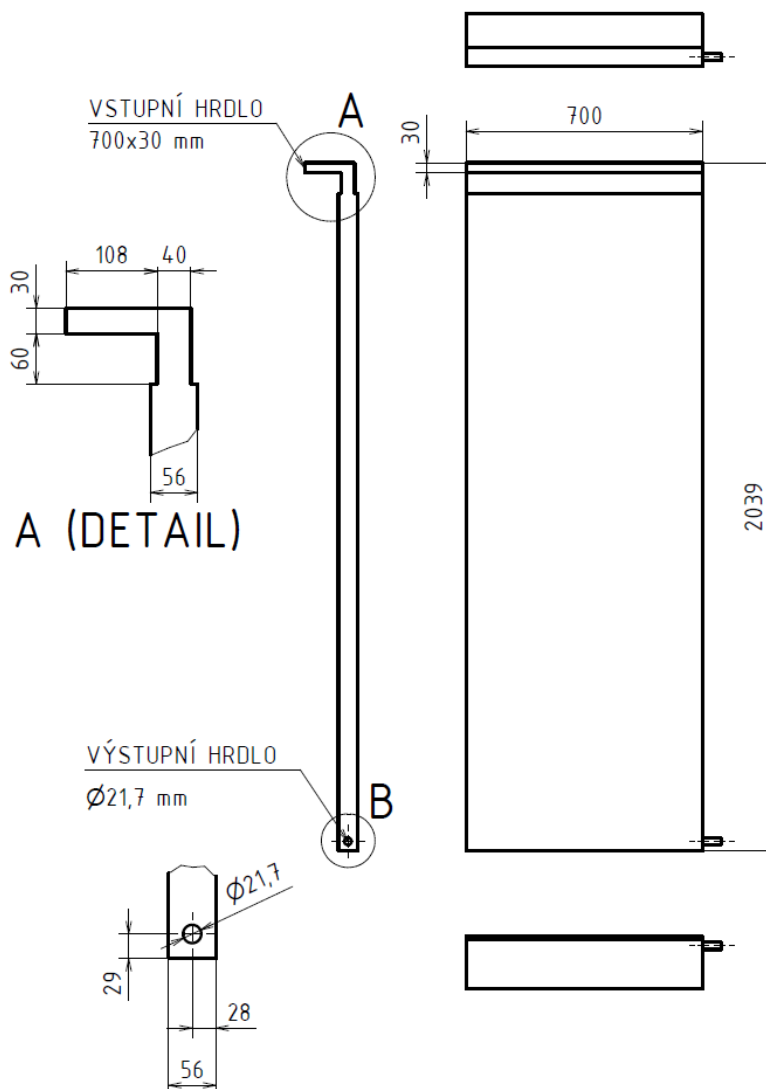
Tabulka 3.2 Výhody a nevýhody variant řešení

Z důvodu nižších nákladů na výrobu a nižší hmotnosti zařízení byla pro výrobu fotobioreaktoru zvolena varianta B.



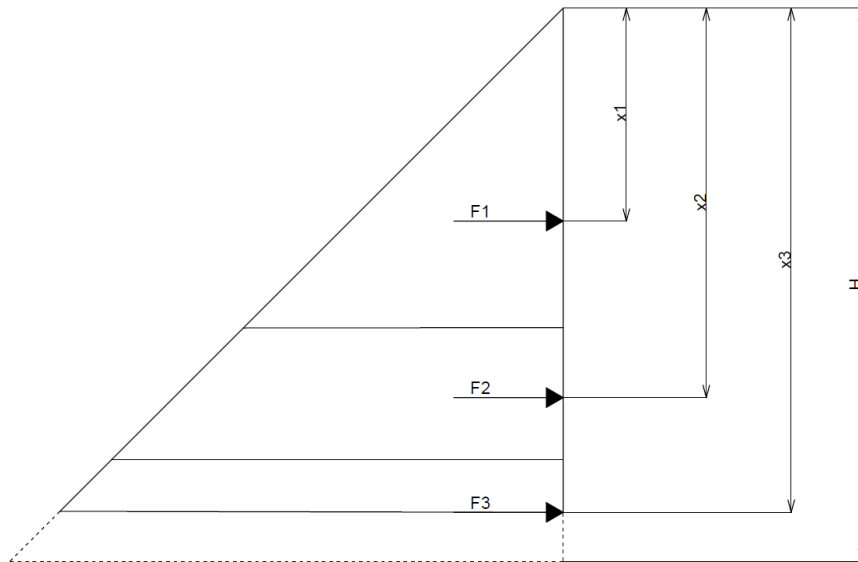
### 3.3 Konstrukce nového fotobioreaktoru

Při konstrukci nové verze deskového fotobioreaktoru vycházím ze základních rozměrů původní verze, které jsou nezbytné pro zachování správné funkce fotobioreaktoru, viz kapitola 3, tj. vnitřních rozměrů nádrže. Vnitřní rozměry, viz obrázek 3.11.



Obrázek 3.11 Vnitřní rozměry fotobioreaktoru (Červený, 2018a)

Dále budou rozměry fotobioreaktoru určeny rozměrem průhledných PMMA desek, které budou použity stejné jako v původním návrhu: tloušťka 10 mm, šířka 750 mm, výška 2000 mm. Díky tomu bude moci být použita pro výrobu katalogová PMMA deska 2000 x 1500 mm. Pro výrobu rámu, který tvoří nádrž fotobioreaktoru, volím U profily DIN 1026-1 U50x25 a pro uzavření vrchní neosvětlené části, hrdla nátoky a pro přírubu nátoky volím desky z 5 mm silného plechu. Rám pro rozložení napětí na PMMA desky bude z L profilů DIN EN 10056-1 L40x25x4 a pro zabránění vyboulení desek volím čtyřhranné trubky DIN EN 10219-2 40x40x4. Umístění těchto výztuh je voleno pro optimální rozložení napětí na stěnu, viz obrázek 3.12.



Obrázek 3.12 Umístění výztuh pro rozložení tlaku

Při výpočtu umístění výztuh vycházím ze zjednodušujícího předpokladu, že dno nádoby a připevnění PMMA desky k rámu působí na stěnu stejnou silou jako výztuha, odtud rovnice číslo (3.2).

$$F = F_1 = F_2 = F_3 = \frac{F_v}{3} \quad (3.2)$$

umístění jednotlivých výztuh pak:

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1}{3} = \frac{h_1^2}{H^2} \rightarrow h_1 = \sqrt{\frac{H^2}{3}} = \sqrt{\frac{1}{3}} * H \quad (3.3)$$

$$x_1 = \frac{2}{3} * h_1 = \frac{2}{3} * \sqrt{\frac{1}{3}} * H \quad (3.4)$$

$$\frac{V_1 + V_2}{V} = \frac{2}{3} = \frac{h_2^2}{H^2} \rightarrow h_2 = \sqrt{\frac{2 * H^2}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} * H \quad (3.5)$$

$$F * x_1 + F * x_2 = 2F * \frac{2}{3} * h_2 \quad (3.6)$$

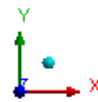
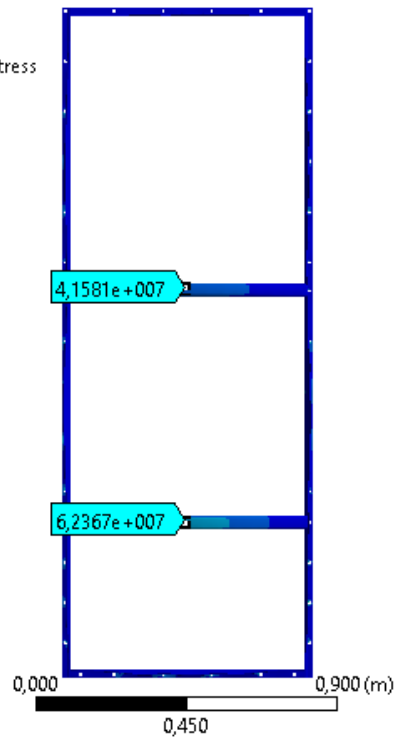
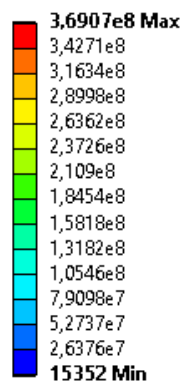
$$x_2 = \frac{2F * \frac{2}{3} * h_2 - F * x_1}{F} = \frac{4}{3} h_2 - x_1 \quad (3.7)$$

$$F * x_1 + F * x_2 + F * x_3 = 3F * \frac{2}{3} H \quad (3.8)$$

$$x_3 = 2H - x_1 - x_2 \quad (3.9)$$

Hodnota parametru  $x_3$  je rovna výšce PMMA desek, tedy  $x_3 = 2000$  mm. Hodnoty parametrů  $x_1$  a  $x_2$  iteračně,  $x_1 = 845$  mm,  $x_2 = 1545$  mm, tj. vzdálenost od horní hrany PMMA desky. Namáhání jednotlivých výztuh, viz obrázek 3.13.

**C: Static Structural**  
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1  
17.04.2018 19:21



Obrázek 3.13 Namáhání výztuh

Více výrobní výkres fotobioreaktoru, viz příloha č. 1.

## 4 Výroba fotobioreaktoru

Výroba nádrže fotobioreaktoru byla provedena externí firmou na základě výrobního výkresu, viz příloha 1. Zařízení bylo dodáno sestavené a jeho těsnost byla předem ověřena tlakovou zkouškou. Dodané zařízení viz obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 Fotobioreaktor, dodání

### 4.1 Montáž fotobioreaktoru

Fotobioreaktor byl montován na předpřipravený rám, na kterém byla původně umístěna předchozí verze fotobioreaktoru, kterou měl tento nahradit. Nejprve bylo nutné odmontovat staré zařízení. Dalším krokem bylo připravit nový fotobioreaktor pro montáž. Zařízení bylo nejprve vybaleno, dále byla hrdla osazena požadovanými armaturami, nebo zaslepena, viz obrázek 4.2. Připravené zařízení bylo poté namontováno na rám, viz obrázek 4.3 a obrázek 4.4.



Obrázek 4.2 Fotobioreaktor, osazení armaturami

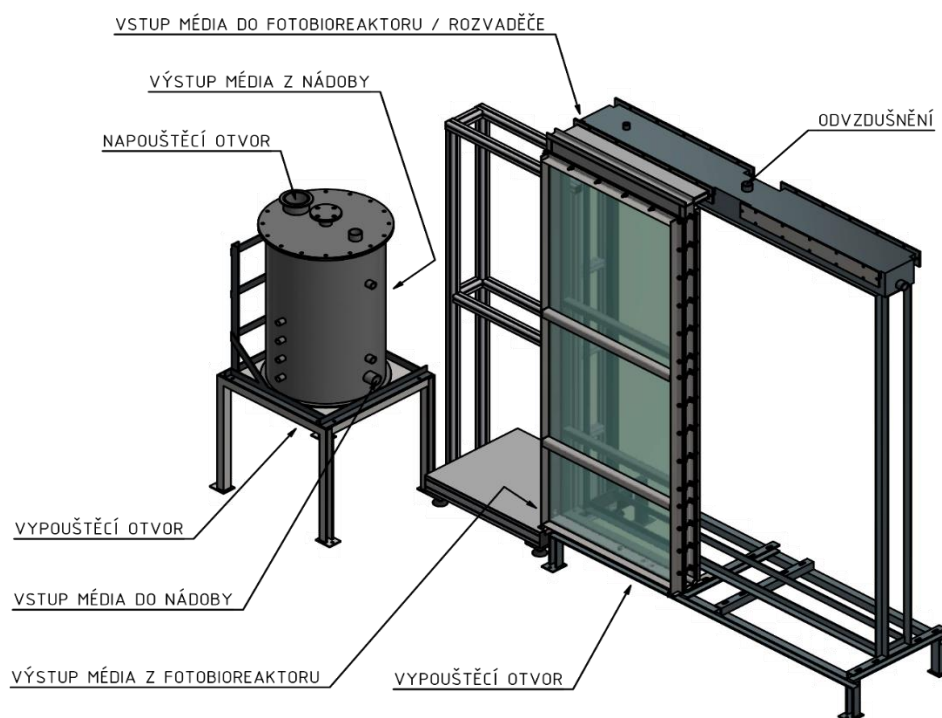


Obrázek 4.3 Fotobioreaktor, osazování



Obrázek 4.4 Fotobioreaktor, montáž

Namontovaný fotobioreaktor, viz obrázek 4.5. Obrázek zobrazuje fotobioreaktor umístěný do původního rámu. Rám je připravený pro umístění až čtyř fotobioreaktorů. Bohužel váha původního fotobioreaktoru byla zhruba 2x nižší a pro upevnění nové verze zařízení není rám dimenzován. Vedle fotobioreaktoru je další konstrukce, která slouží k umístění a upevnění jednotlivých komponent nezbytných pro recirkulaci média a pro měření průtoku a tlaku média. Tyto komponenty nejsou na obrázku zobrazeny. Vedle konstrukce pro komponenty je dále umístěna zadržovací nádrž, která slouží pro akumulaci média před napouštěním fotobioreaktoru a dále jako vyrovnávací nádrž při provozu.



Obrázek 4.5 Fotobioreaktor umístěný na rám (vizualizace)

Při vizuální kontrole fotobioreaktoru v průběhu montáže byl objevený drobný nedostatek konstrukčního návrhu, který pravděpodobně způsobil popraskání PMMA desek na několika místech v oblasti šroubů, viz obrázek 4.6 a obrázek 4.7. Osy otvorů pro šrouby, které jsou vyvrtané do PMMA desek, jsou vzdálené od kraje desky pouhých 10 mm a jejich průměr je 9 mm. Výrobci ale předepisují minimální vzdálenost okraje díry od kraje desky 40 mm (Domacitechnika, 2018). Pro případné budoucí konstrukční úpravy tedy doporučuji využít větších PMMA desek pro zajištění doporučené vzdálenosti otvoru od kraje desky. Při zkouškách těsnosti se ukázalo, že tyto praskliny nemají vliv na těsnost zařízení.



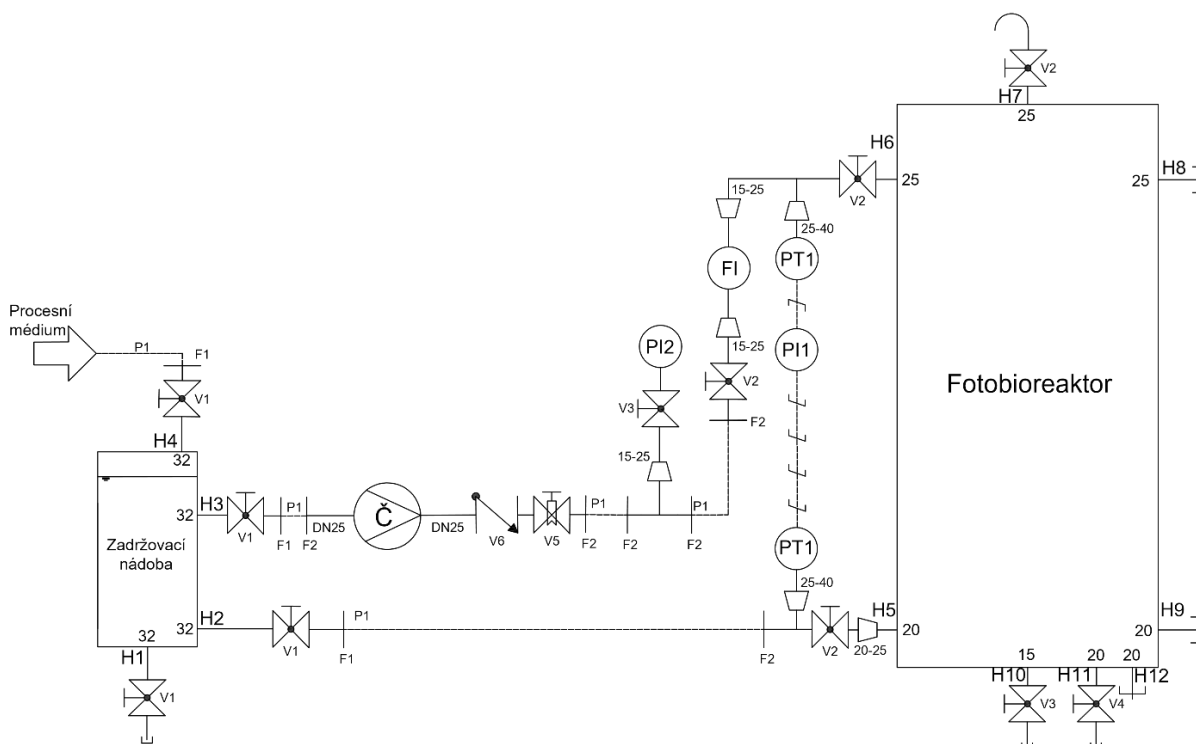
Obrázek 4.6 Praskliny, PMMA deska (a)



Obrázek 4.7 Praskliny, PMMA deska (b)

## 4.2 Zprovoznění fotobioreaktoru

Před zprovozněním celého zařízení bylo ještě potřeba vyměnit čerpadlo. Původně bylo navrženo nevhodné membránové čerpadlo, které způsobovalo pulzní rázy čerpaného média. Původně instalované čerpadlo: Dellmeco DM 25/75 HEE, vzduchomembránové čerpadlo. Nové čerpadlo je Calpeda NGXM 6/22, samonasávací čerpadlo. PID celého zařízení viz následující obrázek:



Obrázek 4.8 Strojně technologické schéma, zapojení fotobioreaktoru

Tabulka hrdel a soupis komponent:

<b>Zadržovací nádoba</b>		
<b>Označení hrdla</b>	<b>Rozměr hrdla</b>	<b>Účel hrdla</b>
H1	DN32	Vypouštěcí otvor
H2	DN32	Vstup média do nádoby
H3	DN32	Výstup média z nádoby
H4	DN32	Napouštěcí otvor

**Tabulka 4.1** Tabulka hrdel, zadržovací nádoba

<b>Fotobioreaktor</b>		
<b>Označení hrdla</b>	<b>Rozměr hrdla</b>	<b>Účel hrdla</b>
H5	DN20	Výstup média z fotobioreaktoru
H6	DN25	Vstup média do fotobioreaktoru / rozvaděče
H7	DN25	Odvzdušňovací ventil
H8	DN25	Vstup média, záložní
H9	DN20	Výstup média, záložní
H10	DN15	Vypouštěcí otvor záložní / příprava na aeraci
H11	DN20	Vypouštěcí otvor
H12	DN20	Záloha

**Tabulka 4.2** Tabulka hrdel, fotobioreaktor

<b>Kusovník</b>		
<b>Označení</b>	<b>Název komponenty</b>	<b>Počet</b>
Č	Čerpadlo Calpeda NGXM 6/22 230V 1,5 kW	1
F1	Hadicový násadec se šestihranem, vnější G1 1/4" průměr hrdla 25 mm	3
F2	Hadicový násadec se šestihranem, vnější G1" průměr hrdla 25 mm	6
FI	Průtokoměr Omega FLR6315D, vnitřní závit G1/2" měřící rozsah: $6,66 \times 10^{-5} - 93,33 \times 10^{-5} \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$	1
P1	Hadice na vodu, vnitřní průměr hadice 25 mm + hadicové spony	5
PI1	Diferenční snímač tlaku DMD331 měřící rozsah: 0-100kPa (jmenovitý tlak 100kPa)	1
PI2	Tlakoměr, vnější závit G1/2"	1
PT1	Čidlo tlaku pro DMD331, vnější závit G1 1/2"	2
V1	Ventil kulový, DN32, vnitřní závit G1 1/4"	4
V2	Ventil kulový, DN25, vnitřní závit G1"	4
V3	Ventil kulový, DN15, vnitřní závit G1/2"	2
V4	Ventil kulový, DN20, vnitřní závit G3/4"	1
V5	Ventil jehlový, DN25, vnitřní závit G1"	1
V6	Zpětný ventil, DN25, vnitřní závit G1"	1

**Tabulka 4.3** Soupis komponent

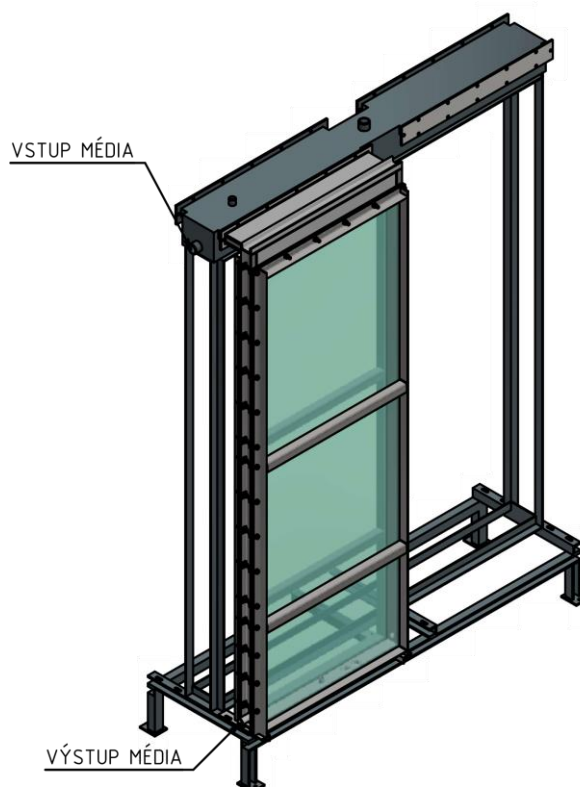
Pro zprovoznění fotobioreaktoru je nejprve nutné napustit zhruba 4/5 objemu zadržovací nádoby procesním médiem. Při napouštění nádrže je potřeba mít uzavřeny všechny vypouštěcí ventily. Po naplnění požadovaného množství kapaliny lze otevřít ventily na hrdlech H2 a H5, čímž se začne samospádem napouštět fotobioreaktor. Dále je nutné otevřít ventil na hrdle H7, který slouží k odvodu celého systému. V této chvíli stále napouštíme kapalinu do zadržovací nádoby, objem nádoby je 100 litrů a objem fotobioreaktoru je 70 litrů plus dalších zhruba 10 % tvoří dopravní zásoby. Jakmile přestane hladina ve fotobioreaktoru stoupat, je možné začít se spuštěním čerpadla. Před samotným spuštěním čerpadla se musíme ujistit, jestli jsou otevřeny ventily na hrdle H3 a H6 a dále ventil na trati mezi čerpadlem a průtokoměrem. Před spuštěním čerpadla by měl být objem zadržovací nádoby naplněn alespoň ze 3/4, výtokové hrdlo z nádrže je ve výšce zhruba 2/3 výšky nádoby. Po spuštění čerpadla začne voda do nádrže proudit napouštěcím otvorem. Zadržovací nádrž je potřeba stále udržovat minimálně ze 3/4 naplněnou. Po naplnění celého objemu fotobioreaktoru je možné přestat dopouštět zadržovací nádrž. Při napouštění fotobioreaktoru je dále nezbytné dle potřeby regulovat odvodušovací ventil. Pokud není systém řádně odvodušněn, při nižších průtocích média dochází k vypouštění fotobioreaktoru vlivem hydrostatického tlaku a kapalina vytéká vypouštěcím hrdlem rychleji, než stíhá natékat.



## 5 Procesní charakteristiky

V této kapitole bude řešena tlaková ztráta, která vzniká v komoře fotobioreaktoru a charakteristika proudění média. Výpočet tlakové ztráty bude proveden analyticky, numericky a teoretický model bude následně ověřen měřením tlakové ztráty na skutečném zařízení. Dále bude provedena analýza smykového napětí na stěně fotobioreaktoru a stanovena místa, kde by mohlo docházet k usazování mikrořas.

Tlaková ztráta je měřena jako rozdíl tlaků média mezi vstupním a výstupním hrdlem celé sestavy viz obrázek 5.1. Pro porovnání výsledků vypočtených tlakových ztrát a výsledků měření je třeba počítat kromě tlakové ztráty ve fotobioreaktoru i tlakovou ztrátu v rozvaděči nátoky.



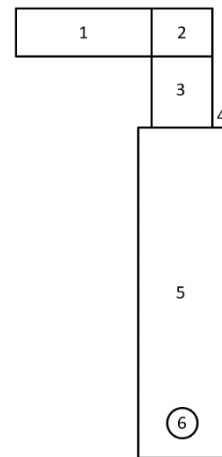
Obrázek 5.1 Fotobioreaktor schématický pohled (vizualizace)

Převážná část následujících kapitol, 5.1, 5.2, 5.4, 5.5 a 5.6, je přebrána z mé semestrální práce: *Analýza proudění ve fotobioreaktoru*. (Červený, 2018a).

### 5.1 Analytický výpočet tlakové ztráty

Pro výpočet tlakové ztráty ve fotobioreaktoru je nejprve nutné určit charakter proudění. Z důvodu zjednodušení výpočtu jsem si rozdělil fotobioreaktor, viz obrázek 3.11, na 6 navazujících segmentů:

- 1) vstupní hrdlo  
(vnitřní rozměry – délka 108 mm, šířka 700 mm, výška 30 mm)
- 2) ostré koleno (90°), čtvercového průřezu
- 3) neosvícená část fotobioreaktoru  
(vnitřní rozměry – délka 60 mm, šířka 700 mm, hloubka 40 mm)
- 4) rozšíření (hloubka kanálu z 40 mm na 56 mm)
- 5) osvícená část fotobioreaktoru (vnitřní rozměry – délka 1949 mm, šířka 700 mm, hloubka 56 mm)
- 6) výstupní hrdlo (vnitřní průměr 21,7 mm)



Obrázek 5.2 Segmenty fotobioreaktor (Červený, 2018a)

Analýza proudění je prováděna pro fotobioreaktor, do kterého je čerpadlem dopravováno  $3,1 \text{ m}^3$  vody za hodinu, tedy  $8,61 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Ze znalosti rovnice kontinuity pak lze vypočítat rychlost proudění pro jednotlivé průřezy. Hodnoty absolutních drsností ( $k$ ) jsou:

ocel	0,1	mm
PMMA	0,01	mm

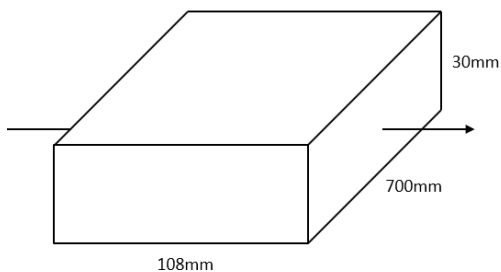
Tabulka 5.1 Hodnoty absolutních drsností pro materiály (Červený, 2018a)

Fyzikální vlastnosti vody jsou:

teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25
hustota [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	997
dynamická viskozita [ $\text{Pa s}$ ]	$0,89 \times 10^{-3}$

Tabulka 5.2 Fyzikální vlastnosti vody (Červený, 2018a)

- 1) Vstupní hrdlo



Obrázek 5.3 Rozměry vstupního hrdla (Červený, 2018a)

Průtok fotobioreaktorem je  $8,61 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  odsud:

$$u_1 = \frac{\dot{V}}{S_1} = \frac{\dot{V}}{a_1 * b_1} = \frac{8,61 * 10^{-4}}{0,7 * 0,03} = 0,041 \text{ ms}^{-1} \quad (5.1)$$

Pro výpočet Reynoldsova čísla je třeba určit hydraulický průměr potrubí s předpokladem, že je celý kanál zatopený vodou:

$$d_1 = \frac{4 * S_1}{O_1} = \frac{4 * 0,7 * 0,03}{2 * (0,7 + 0,03)} = 0,05753 \text{ m} \quad (5.2)$$

Reynoldsovo číslo:

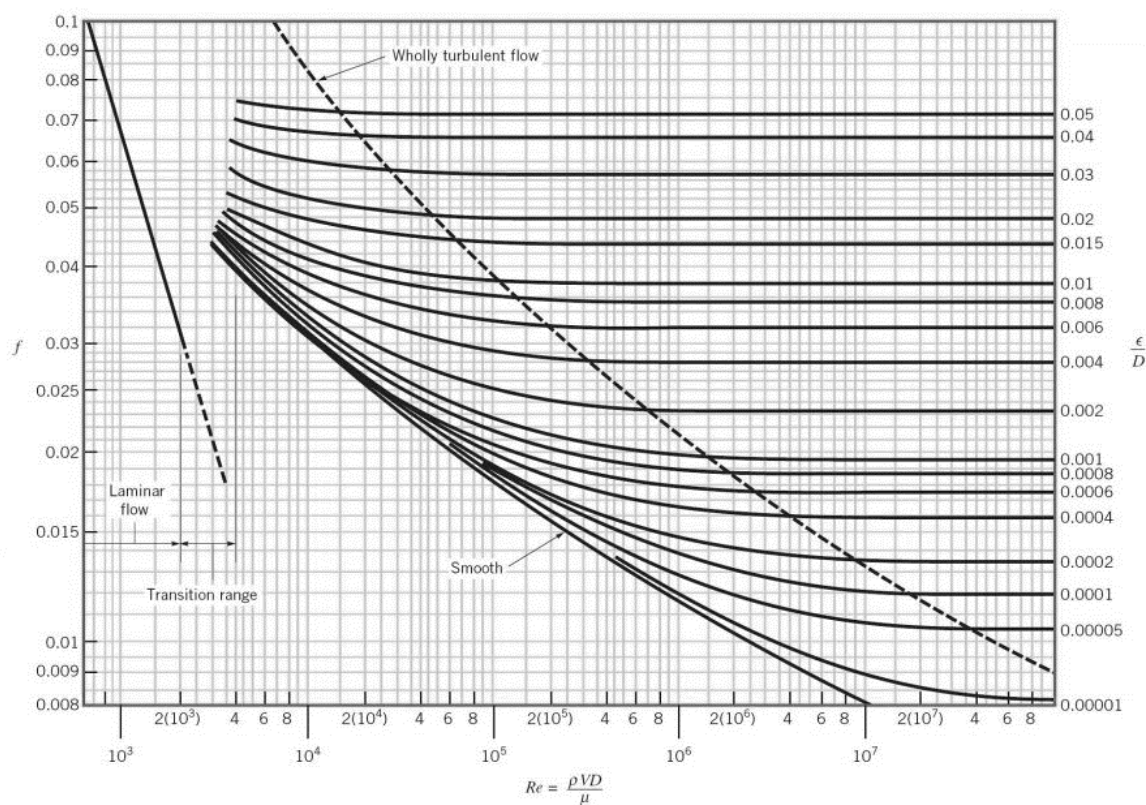
$$Re_1 = \frac{u_1 d_1 \rho}{\mu} = \frac{0,041 * 0,05753 * 997}{0,89 * 10^{-3}} = 2\,643 \quad (5.3)$$

Z Reynoldsova čísla je patrné, že se nacházíme v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním prouděním. Vzhledem k bezpečnosti výpočtu budu dále proudění uvažovat jako turbulentní, protože dle Moodyho diagramu, viz obrázek 5.4, pro něj vycházejí vyšší hodnoty součinitele třecích ztrát  $\lambda$  a tudíž i tlaková ztráta. Součinitel třecích ztrát tedy:

$$\lambda = f(Re, k^*) \quad (5.4)$$

kde relativní drsnost potrubí  $k^*$ :

$$k^*_1 = \frac{k}{d_1} = \frac{0,1}{57,53} = 1,738 * 10^{-3} \quad (5.5)$$



Obrázek 5.4 Moodyho diagram (Diagram site, 2018)

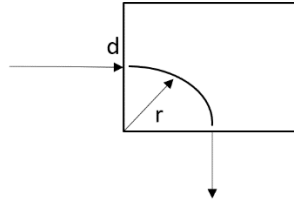
$$\lambda_1 = \left\{ 2 * \log \left[ 0,27 * k^*_1 + \left( \frac{7}{Re_1} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,04816 \quad (5.6)$$

A tlaková ztráta v prvním segmentu:

$$\Delta p_{z1} = \lambda_1 \frac{u_1^2}{2} * \frac{l_1}{d_1} * \rho = 0,04816 * \frac{0,041^2}{2} * \frac{0,108}{0,05753} * 997$$

$$= 0,0757 Pa$$
(5.7)

2) Ostré koleno (90°), čtvercového průřezu

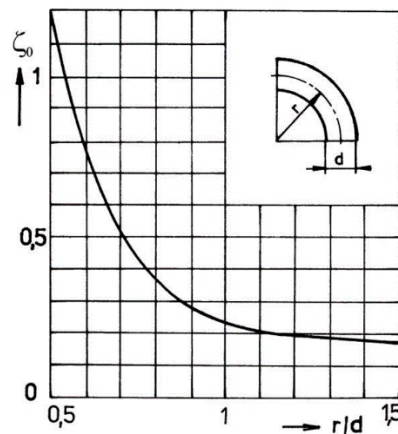


Obrázek 5.5 Ostré koleno (Červený, 2018a)

Pro které součinitel místní ztráty:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_t$$
(5.8)

kde  $\zeta_0 = 1,2$  viz obrázek 5.6 pro  $r = 0,015m$  a  $d = d_1 = 0,05753m$ , dle rovnice (5.2)



Obrázek 5.6 Závislosti místních ztrát na geometrii kolena

pro  $\zeta_t$  platí:

$$\zeta_t = \frac{\pi}{2} * \lambda_1 * \frac{r}{d} = 0,0394$$
(5.9)

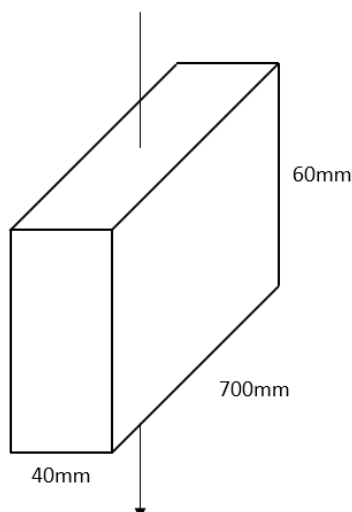
Po dosazení do rovnice (5.8)  $\zeta = 1,2394$

$$e_{z2} = \xi \frac{u_1^2}{2} = 1,2394 * \frac{0,041^2}{2} = 0,00104$$
(5.10)

Tlaková ztráta pak:

$$\Delta p_{z2} = e_{z2} * \rho = 0,00104 * 997 = 1,039 Pa$$
(5.11)

3) Neosvícená část fotobioreaktoru analogicky k segmentu číslo 1.



Obrázek 5.7 Rozměry neosvícené části (Červený, 2018a)

$$u_3 = \frac{\dot{V}}{S_3} = \frac{8,61 \cdot 10^{-4}}{0,7 \cdot 0,04} = 0,031 \text{ m s}^{-1} \quad (5.12)$$

$$d_3 = \frac{4 \cdot S_3}{O_3} = \frac{4 \cdot 0,7 \cdot 0,04}{2 \cdot (0,7 + 0,04)} = 0,0757 \text{ m} \quad (5.13)$$

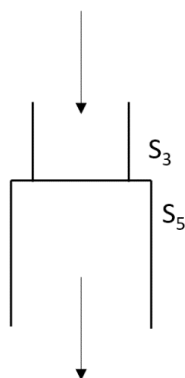
$$Re_3 = \frac{u_3 d_3 \rho}{\mu} = \frac{0,031 \cdot 0,0757 \cdot 997}{0,89 \cdot 10^{-3}} = 2607 \quad (5.14)$$

$$k^*_3 = \frac{k}{d_3} = \frac{0,1}{75,7} = 1,32 \cdot 10^{-3} \quad (5.15)$$

$$\lambda_3 = \left\{ 2 \cdot \log \left[ 0,27 \cdot k^*_3 + \left( \frac{7}{Re_3} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,04796 \quad (5.16)$$

$$\Delta p_{z3} = \lambda_3 \frac{u_3^2}{2} \cdot \frac{l_3}{d_3} \cdot \rho = 0,04796 \cdot \frac{0,031^2}{2} \cdot \frac{0,06}{0,0757} \cdot 997 = 0,020 \text{ Pa} \quad (5.17)$$

4) Rozšíření analogicky k segmentu číslo 2.



Obrázek 5.8 Rozšíření (Červený, 2018a)

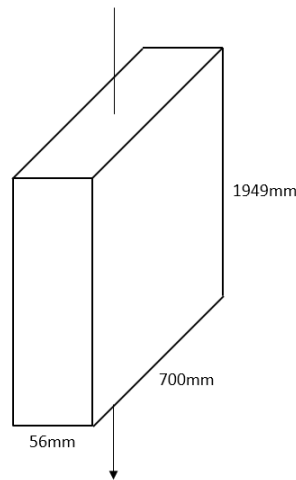
Součinitel místní ztráty:

$$\zeta = \left(1 - \frac{S_3}{S_5}\right)^2 = 0,0816 \quad (5.18)$$

$$e_{z4} = \zeta \frac{u_3^2}{2} = 0,0816 * \frac{0,031^2}{2} = 3,86 * 10^{-5} \quad (5.19)$$

$$\Delta p_{z4} = e_{z4} * \rho = 3,86 * 10^{-5} * 997 = 0,038 Pa \quad (5.20)$$

- 5) Osvícená část fotobioreaktoru analogicky k segmentu číslo 1. Při výpočtu tlakové ztráty zanedbávám rozdíl mezi absolutní drsností ocelové stěny a PMMA desek a uvažuji celou oblast, jako kdyby byla vyrobena z PMMA desek.



Obrázek 5.9 Rozměry osvícené části fotobioreaktoru (Červený, 2018a)

$$u_5 = \frac{\dot{V}}{S_5} = \frac{8,61 * 10^{-4}}{0,7 * 0,056} = 0,022 ms^{-1} \quad (5.21)$$

$$d_5 = \frac{4 * S_5}{O_5} = \frac{4 * 0,7 * 0,056}{2 * (0,7 + 0,056)} = 0,1037 m \quad (5.22)$$

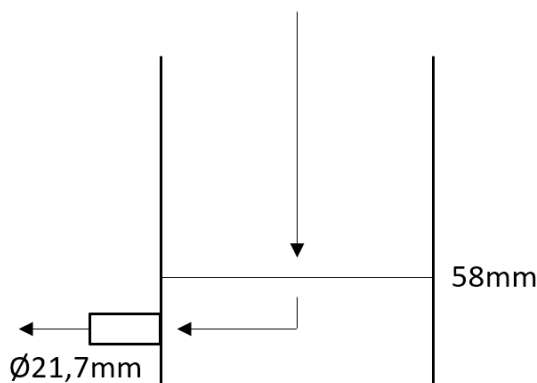
$$Re_5 = \frac{u_5 d_5 \rho}{\mu} = \frac{0,022 * 0,1037 * 997}{0,89 * 10^{-3}} = 2 552 \quad (5.23)$$

$$k^*_5 = \frac{k}{d_5} = \frac{0,01}{103,7} = 9,643 * 10^{-5} \quad (5.24)$$

$$\lambda_5 = \left\{ 2 * \log \left[ 0,27 * k^*_5 + \left( \frac{7}{Re_5} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,04712 \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{z5} &= \lambda_5 \frac{u_5^2}{2} * \frac{l_5}{d_5} * \rho = 0,04712 * \frac{0,022^2}{2} * \frac{1,949}{0,1037} * 997 \\ &= 0,21 Pa \end{aligned} \quad (5.26)$$

## 6) Výstupní hrdlo



Obrázek 5.10 Rozměr výtokového otvoru

Tento segment rozdělím na dvě oblasti, ve kterých vzniká tlaková ztráta. Nejprve přechod proudění z vertikálního směru do směru horizontálního. Pro výpočet zde uvažuji myšlené ostré koleno. Rychlost proudění předpokládám, jako by tekutina proudila obdélníkovým kanálem s rozměry 58x56mm (2 x výška osy výtoku od dna nádoby x hloubka). Tlaková ztráta v ostrém kolenu analogicky k segmentu číslo 2.

$$u_{6a} = \frac{\dot{V}}{S_{6a}} = \frac{8,61 \cdot 10^{-4}}{0,058 \cdot 0,056} = 0,265 \text{ ms}^{-1} \quad (5.27)$$

$$d_{6a} = \frac{4 \cdot S_{6a}}{O_{6a}} = \frac{4 \cdot 0,058 \cdot 0,056}{2 \cdot (0,058 + 0,056)} = 0,0570 \text{ m} \quad (5.28)$$

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_t \quad (5.29)$$

kde  $\zeta_0 = 1,2$  viz obrázek 5.6 pro  $r = 0,029\text{m}$  a  $d = d_{6a} = 0,0570\text{m}$ , dle rovnice (5.28).  $\zeta_t$  v tomto případě uvažuji rovno nule, jelikož se jedná o změnu směru proudění uvnitř nádrže. Z rovnice (5.29):  $\zeta = 1,2$

$$e_{z6a} = \xi \frac{u_{6a}^2}{2} = 1,2 \cdot \frac{0,265^2}{2} = 0,0422 \quad (5.30)$$

Tlaková ztráta:

$$\Delta p_{z6a} = e_{z6a} \cdot \rho = 0,0422 \cdot 997 = 42,07 \text{ Pa} \quad (5.31)$$

Druhou oblastí je výtok z nádoby do potrubí o průměru 21,7 mm. Pro součinitel místní ztráty náhlým zúžením průřezu platí:

$$\zeta = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) \quad (5.32)$$

kde  $S_1$  je průměr kanálu před zúžením a  $S_2$  po zúžení. Jelikož se jedná o velký rozdíl ploch, uvažuji jako hodnotu součinitele místní ztráty nejhorší možnou variantu:  $\zeta = 0,5$ . Výtoková trubka je v nádrži fotobioreaktoru zasazena v rovině s vnitřní stěnou a přechod do trubky není zkosený ani zaoblený. Jako rychlost průtoku uvažuji také tu nejhorší variantu, tedy rychlost ve výtokovém hrdle.

$$u_{6b} = \frac{\dot{V}}{S_{6b}} = \frac{4 \cdot 8,61 \cdot 10^{-4}}{(\pi \cdot 0,0217^2)} = 2,338 \text{ ms}^{-1} \quad (5.33)$$

$$e_{z6b} = \xi \frac{u_{6b}^2}{2} = 0,5 * \frac{2,338^2}{2} = 1,355 \quad (5.34)$$

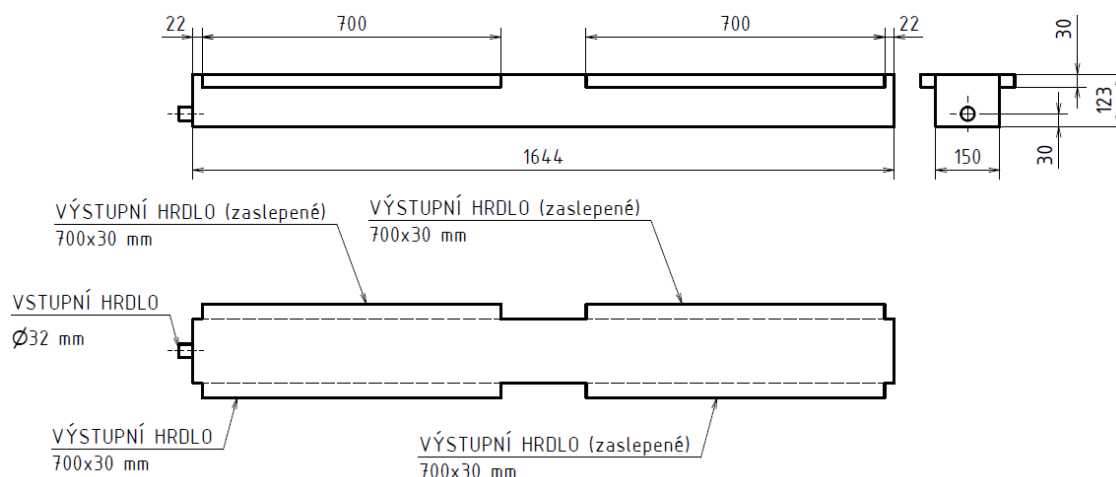
$$\Delta p_{z6b} = e_{z6b} * \rho = 1,355 * 997 = 1351 Pa \quad (5.35)$$

Celková tlaková ztráta ve fotobioreaktoru je součet tlakových ztrát v jednotlivých segmentech:

$$\Delta p_z = 1395 Pa \quad (5.36)$$

Z vypočtených hodnot je patrné, že tlakové ztráty, které vznikají prouděním v prostoru fotobioreaktoru, jsou zanedbatelné s těmi, které vznikají v místech, kde tekutina tyče nejrychleji, například na výtoku z nádrže. Velikost tlakové ztráty je přímo úměrná druhé mocnině rychlosti proudění média. Ztráta, která vzniká zúžením výtokového hrdla, v tomto případě tvoří 96,9 % celkové tlakové ztráty.

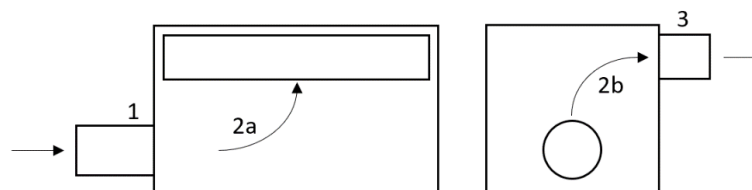
Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro porovnání výsledků vypočtených tlakových ztrát a výsledků měření je třeba počítat kromě tlakové ztráty ve fotobioreaktoru i tlakovou ztrátu v rozvaděči nátok. Vnitřní rozměry viz obrázek 5.11. Rozvaděč je navržený pro připojení až čtyř fotobioreaktorů.



Obrázek 5.11 Vnitřní rozměry rozvaděče

Protože je ale připojený jen jeden fotobioreaktor, zjednodušil jsem si rozvaděč jen na oblast, která má vliv na tlakovou ztrátu, a tu jsem si rozdělil na 3 navazující segmenty:

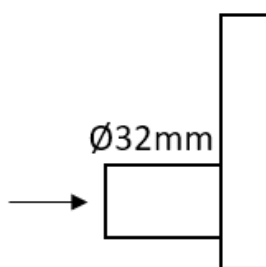
- 1) vstupní hrdlo (vnitřní průměr 32 mm) – nátok do nádrže
- 2) změna směru toku média
- 3) výstupní hrdlo (vnitřní rozměry – délka 108 mm, šířka 700 mm, výška 30 mm)



Obrázek 5.12 Segmenty rozvaděč



1) Vstupní hrdlo – nátok do nádrže



Obrázek 5.13 Rozšíření, nátok do nádrže

Součinitel místní ztráty rozšíření, analogicky k rovnici číslo (5.18):

$$\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (5.37)$$

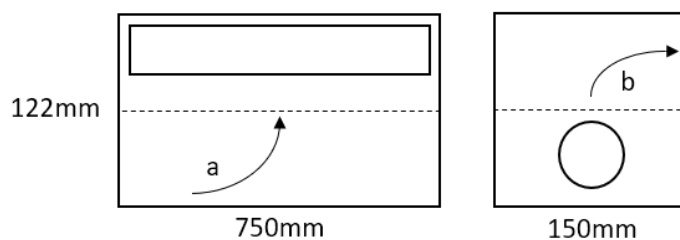
Vzhledem k velkému rozdílu mezi plochou nátokového hrdla a plochou nádrže uvažuji pro součinitel místní ztráty nátok do nádoby nejhorší možnou variantu:  $\zeta = 1$ . Dále analogicky k předchozím případům:

$$u_1 = \frac{\dot{V}}{S_1} = \frac{4 * 8,61 * 10^{-4}}{(\pi * 0,032^2)} = 1,07 \text{ ms}^{-1} \quad (5.38)$$

$$e_{z1} = \zeta \frac{u_1^2}{2} = 1 * \frac{1,07^2}{2} = 0,573 \quad (5.39)$$

$$\Delta p_{z1} = e_{z1} * \rho = 0,573 * 997 = 571 \text{ Pa} \quad (5.40)$$

2) Změna směru toku média



Obrázek 5.14 Rozměry rozvaděče, zjednodušené

Pro potřeby výpočtu tlakových ztrát změnou směru toku média jsem si rozvaděč rozdělil myšlenou přepážkou na dvě poloviny, kde v každé dochází k jedné změně směru proudění, viz obrázek 5.14. Myšlený hydraulický průměr potrubí pro spodní polovinu je:

$$d_{2a} = \frac{4 * S_{2a}}{O_{2a}} = \frac{4 * 0,15 * 0,061}{2 * (0,15 + 0,061)} = 0,0867 \text{ m} \quad (5.41)$$

$$u_{2a} = \frac{\dot{V}}{S_{2a}} = \frac{8,61 * 10^{-4}}{0,15 * 0,061} = 0,0941 \text{ ms}^{-1} \quad (5.42)$$

Součinitel místní ztráty změnou směru toku v kolenu platí stejně jako výše:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_t \quad (5.43)$$

kde  $\zeta_0 = 1,2$ , viz obrázek 5.6, pro  $r = 0,0305\text{m}$  a  $d = d_{2a} = 0,0867\text{m}$ , dle rovnice (5.41) stejně jako v segmentu číslo 6 při výpočtu tlakové ztráty ve fotobioreaktoru zanedbávám vliv  $\zeta_t$ . Z rovnice (5.43) tedy  $\zeta = 1,2$ .

$$e_{z2a} = \xi \frac{u_{2a}^2}{2} = 1,2 * \frac{0,0941^2}{2} = 0,00531 \quad (5.44)$$

Tlaková ztráta:

$$\Delta p_{z2a} = e_{z2a} * \rho = 0,00531 * 997 = 5,30 \text{ Pa} \quad (5.45)$$

Pro vrchní polovinu pak:

$$d_{2b} = \frac{4 * S_{2b}}{O_{2b}} = \frac{4 * 0,15 * 0,75}{2 * (0,15 + 0,75)} = 0,250 \text{ m} \quad (5.46)$$

$$u_{2b} = \frac{\dot{V}}{S_{2a}} = \frac{8,61 * 10^{-4}}{0,15 * 0,75} = 7,65 * 10^{-3} \text{ ms}^{-1} \quad (5.47)$$

Součinitel místní ztráty bude analogicky k předchozímu případu:

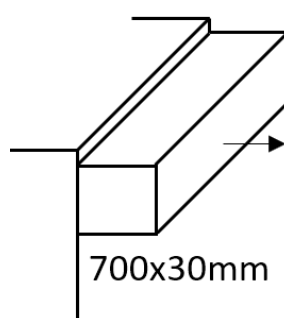
$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_t \quad (5.48)$$

kde  $\zeta_0 = 1,2$ , viz obrázek 5.6, pro  $r = 0,0305\text{m}$  a  $d = d_{2b} = 0,250\text{m}$ , dle rovnice (5.46), vliv  $\zeta_t$  stejně jako výše zanedbávám. Z rovnice (5.48) tedy  $\zeta = 1,2$ .

$$e_{z2b} = \xi \frac{u_{2b}^2}{2} = 1,2 * \frac{7,65 * 10^{-3}^2}{2} = 3,51 * 10^{-5} \quad (5.49)$$

$$\Delta p_{z2b} = e_{z2b} * \rho = 3,51 * 10^{-5} * 997 = 0,0350 \text{ Pa} \quad (5.50)$$

### 3) Výstupní hrdlo



Obrázek 5.15 Výstupní hrdlo, rozměry

Pro součinitel místní ztráty náhlým zúžením průřezu platí, analogicky k rovnici (5.32):

$$\zeta = 0,5 * \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) = 0,26 \quad (5.51)$$

kde  $S_1$  je vnitřní průřez nádrže ve směru proudění média,  $S_1 = 0,043 \text{ m}^2$ , viz obrázek 5.14,  $S_2$  je průřez výtokového hrdla,  $S_2 = 0,021 \text{ m}^2$ . Rychlost proudění je shodná se segmentem č. 1 fotobioreaktoru, dle rovnice (5.1),  $u_3 = 0,041 \text{ m s}^{-1}$ .

$$e_3 = \zeta \frac{u_3^2}{2} = 0,26 * \frac{0,041^2}{2} = 2,15 * 10^{-4} \quad (5.52)$$

$$\Delta p_3 = e_3 * \rho = 2,15 * 10^{-4} * 997 = 0,214 \text{ Pa} \quad (5.53)$$

Celková tlaková ztráta pro rozvaděč:

$$\Delta p_z = 577 \text{ Pa} \quad (5.54)$$

Pro fotobioreaktor a rozvaděč dohromady:

$$\Sigma \Delta p_z = 1\,972 \text{ Pa} \quad (5.55)$$

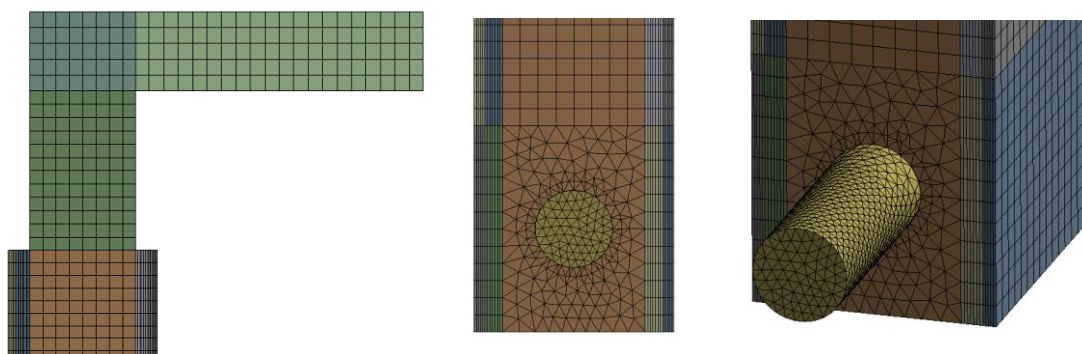
## 5.2 Numerický výpočet tlakové ztráty

Pro numerické řešení výpočtu tlakové ztráty byl použit program Ansys Fluent. Pro simulaci byl použit CAD model reálného deskového fotobioreaktoru. Prvním krokem bylo uzavření všech hrdel a vyplnění celého vnitřního prostoru reaktoru kapalinou. Dále byly odstraněny veškeré přebytečné konstrukční části reaktoru. Kvůli efektivnějšímu síťování byl dále objem rozdělen na několik na sebe navazujících segmentů, podobně jako při analytickém výpočtu, viz obrázek 5.16

Pro vysíťování objemu byla použita metoda sweep, která vytvořením pravidelných šestistěnů a čtyřstěnů zajišťuje efektivní výpočty proudění. Při síťování byla preferována metoda šestistěnů, v místech, kde nebylo možné tuto metodu použít, jako je okolí kruhových výtoků, byly zvoleny standartní čtyřstěny. Podél stěn průhledných PMMA desek je síť speciálně zhuštěna, pro přesnější výpočty proudění podél stěn, viz obrázek 5.17. Síť má celkem 2 143 576 elementů.



Obrázek 5.16 Fotobioreaktor geometrie, Ansys (Červený, 2018a)



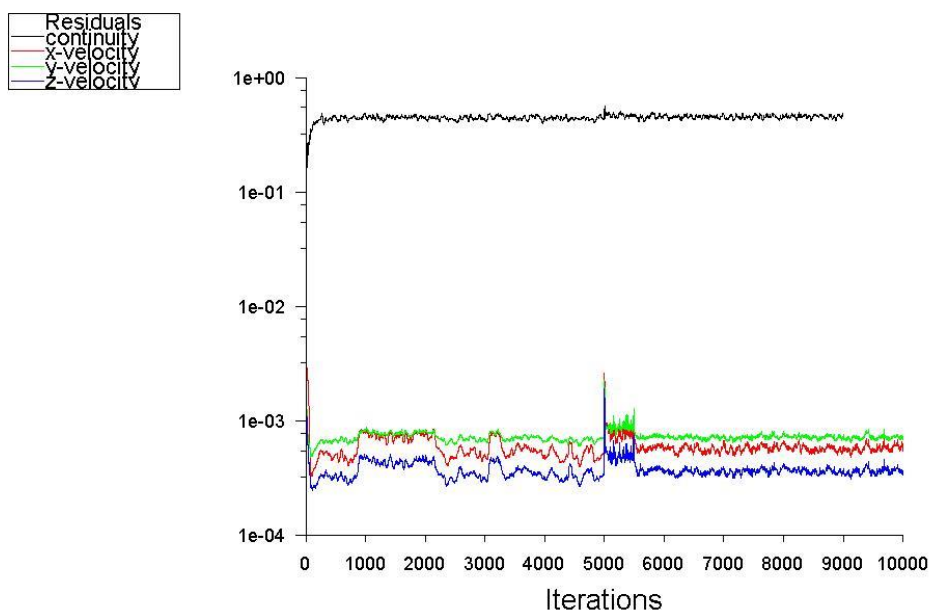
Obrázek 5.17 Fotobioreaktor síťování, Ansys (Červený, 2018a)

Analýza proudění byla provedena v programu Ansys Fluent. Dle analytického řešení, viz výše, bylo zjištěno, že při daném průtoku kapaliny se nacházíme v přechodové oblasti mezi turbulentním a laminárním prouděním. Pro takto malé hodnoty Reynoldsových čísel se doporučuje použít výpočtové modely určené pro laminární proudění. Vstupní parametry vody jsou shodné jako v případě analytického výpočtu, viz tabulka 5.2. Z důvodu vyšší přesnosti byly provedeny dva výpočty, každý po 5000 iteracích. Nastavení výpočtů:

číslo výpočtu	1.	2.
Models	Viscous - laminar	Viscous - laminar
Gradient	Least Squares Cell Based	Least Squares Cell Based
Pressure	Standart	Second Order
Momentum	Second Order Upwind	Second Order Upwind
Počet iterací	5000	5000

Tabulka 5.3 Nastavení výpočtů, Ansys Fluent (Červený, 2018a)

Reziduální křivky výpočtů:



Obrázek 5.18 Výpočet proudění, reziduální křivky fotobioreaktor, Ansys Fluent

A tlaková ztráta fotobioreaktoru stanovená numerickou metodou pomocí programu Ansys Fluent:

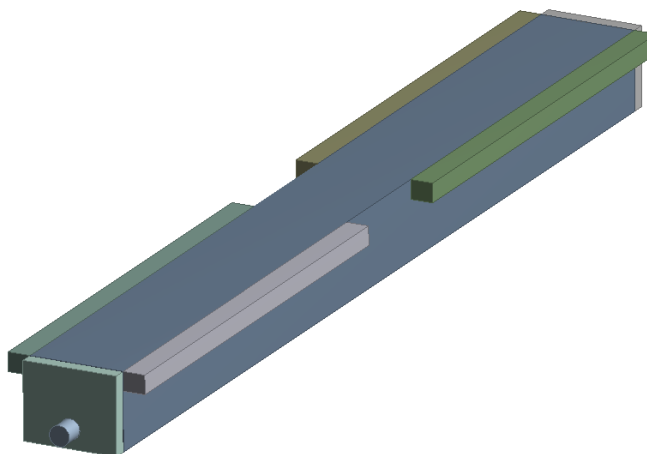
<b>Area-Weighted Average Total Pressure</b>	<b>(pascal)</b>
<b>inlet</b>	<b>4947.0553</b>
<b>outlet_1</b>	<b>3033.7421</b>

Obrázek 5.19 Tlaková ztráta Fotobioreaktor, výpis Ansys Fluent

Tlaková ztráta komory fotobioreaktoru tedy:

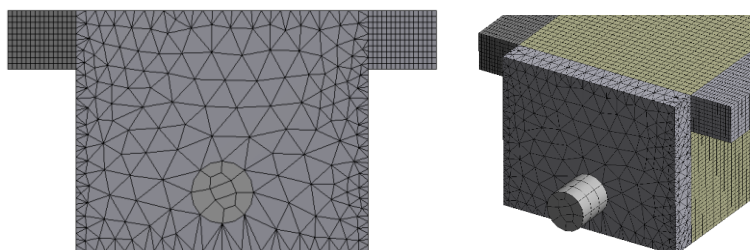
$$\Delta p_z = 4947 - 3033,7 = 1\,913,3 \text{ Pa} \quad (5.56)$$

Stejně jako v případě analytického výpočtu je pro porovnání výsledků s naměřenými daty nutné stanovit také tlakovou ztrátu v rozvaděči, ke kterému je fotobioreaktor připojený. Příprava výpočtového modelu je analogická fotobioreaktoru. Geometrie vnitřního objemu rozvaděče:



Obrázek 5.20 Rozvaděč geometrie, Ansys

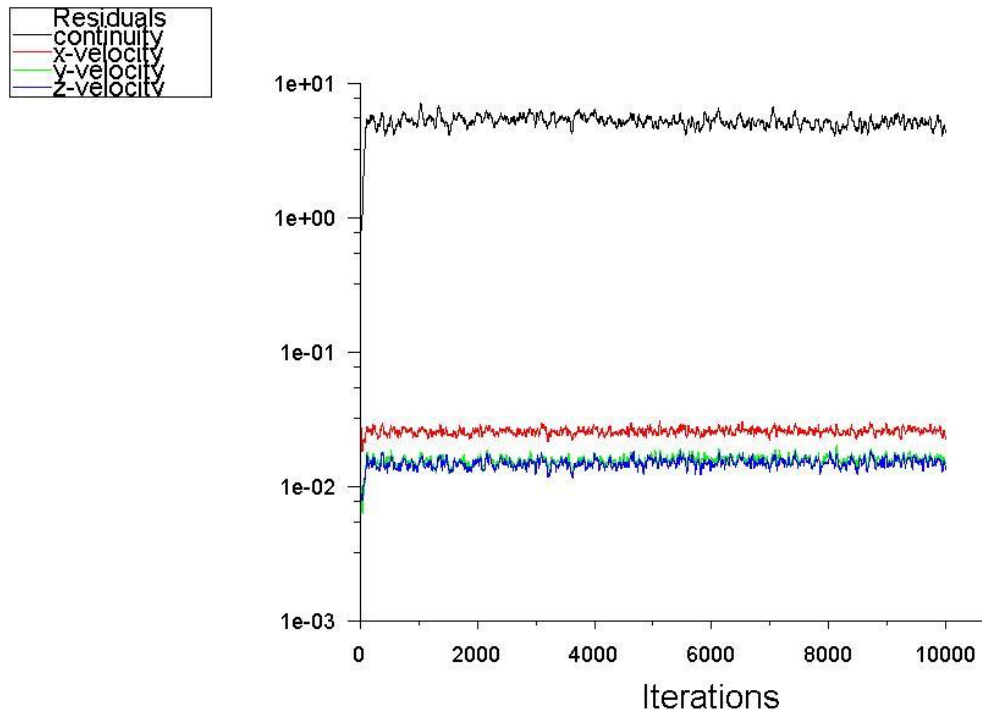
Síťování geometrie:



Obrázek 5.21 Rozvaděč síťování, Ansys

Nastavení parametrů výpočtu je shodné s výpočtem fotobioreaktoru, viz tabulka 5.3.

Reziduální křivky:



Obrázek 5.22 Výpočet proudění, reziduální křivky rozvaděč, Ansys Fluent

Tlaková ztráta rozvaděče stanovené numerickou metodou pomocí programu Ansys Fluent:

Area-Weighted Average Total Pressure	(pascal)
inlet	570.77969
outlet	10.080213

Obrázek 5.23 Tlaková ztráta rozvaděč, výpis Ansys Fluent

Tlaková ztráta rozvaděče tedy:

$$\Delta p_z = 570,8 - 10,1 = 560,7 \text{ Pa} \quad (5.57)$$

Spojením rovnic (5.56) a (5.57) je celková tlaková ztráta:

$$\Sigma \Delta p_z = 2\,474 \text{ Pa} \quad (5.58)$$

### 5.3 Experimentální měření tlakové ztráty

Experimentální metodou byla změřena tlaková ztráta na skutečném zařízení. Byla provedena dvě měření. Při prvním měření bylo zařízení zapojeno dle schématu, viz obrázek 4.8 výše, a průtok byl regulován pomocí jehlového ventilu na výstupu z čerpadla. Při druhém měření jsme po sérii úvah odstranili jehlový ventil a průtok jsme regulovali kulovým ventilem, který je umístěný mezi čerpadlem a průtokoměrem. Kulový ventil není vhodný pro přesnou regulaci průtoku, ale odstranění jehlového ventilu způsobilo, že jsme byli schopni dosáhnout vyššího průtoku média. V prvním

případě byl maximální dosažitelný průtok média  $9,55 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , v druhém případě bylo naměřeno maximálně  $10,94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , což je nejvyšší hodnota měřicího rozsahu průtokoměru, viz tabulka 4.3, kulový ventil byl v této chvíli otevřený zhruba z 50 %. Minimální objemový průtok byl v případě prvního měření omezený rychlostí samovolného vytékání média z fotobioreaktoru vlivem působení tíhového pole Země, kdy při příliš nízkých průtocích docházelo k vypouštění kapaliny z prostoru fotobioreaktoru. Později se ukázalo, že to bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným odvodušněním celého systému. Při druhém měření již k tomuto jevu nedocházelo. V prvním případě byl naměřený minimální průtok média  $7,55 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , při druhém až  $4,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Naměřené hodnoty tlakových ztrát viz tabulka 5.4. Další tabulka 5.5 zobrazuje vypočtené hodnoty tlakových ztrát analytickou a numerickou metodou. Pro oba výpočty jsou použity stejné výpočtové modely, jako jsou uvedeny v kapitole 5.1 a 5.2. Vzhledem k tomu, že proudění v prostoru fotobioreaktoru se pro všechny průtoky nachází v přechodové oblasti, uvažují stejné předpoklady výpočtů jako pro původní modely. Pro zkrácení doby výpočtů byl pro numerickou metodu použit výpočet o 250 iteracích, na stanovení tlakových ztrát by ale tato volba neměla mít výrazný vliv.

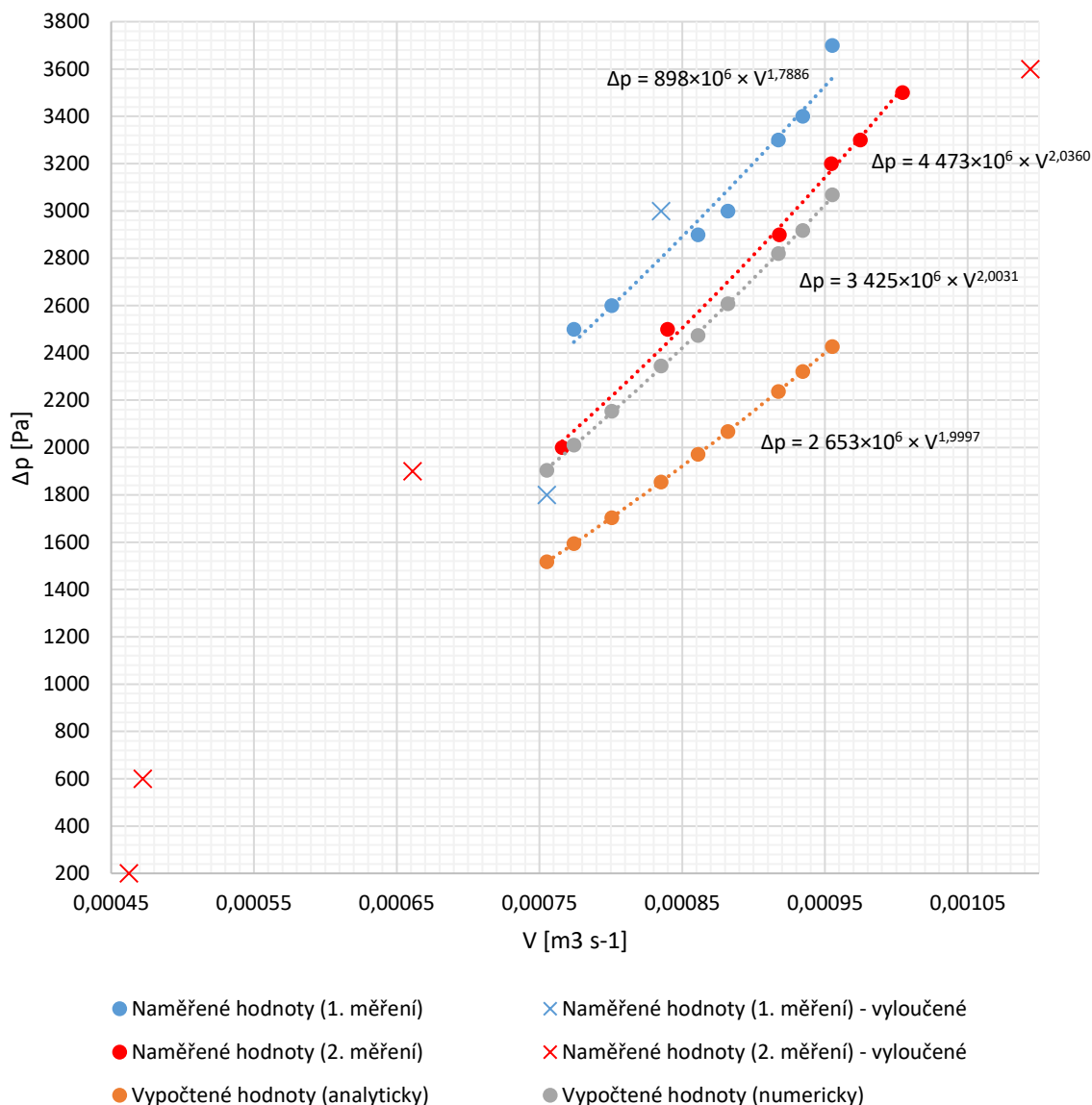
měření číslo 1		měření číslo 2	
V [ $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ]	$\Delta p$ [Pa]	V [ $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ]	$\Delta p$ [Pa]
$7,55 \times 10^{-4}$	1800	$4,62 \times 10^{-4}$	200
$7,74 \times 10^{-4}$	2500	$4,72 \times 10^{-4}$	600
$8,01 \times 10^{-4}$	2600	$6,61 \times 10^{-4}$	1900
$8,35 \times 10^{-4}$	3000	$7,66 \times 10^{-4}$	2000
$8,61 \times 10^{-4}$	2900	$8,40 \times 10^{-4}$	2500
$8,82 \times 10^{-4}$	3000	$9,18 \times 10^{-4}$	2900
$9,17 \times 10^{-4}$	3300	$9,55 \times 10^{-4}$	3200
$9,34 \times 10^{-4}$	3400	$9,75 \times 10^{-4}$	3300
$9,55 \times 10^{-4}$	3700	$10,94 \times 10^{-4}$	3500

Tabulka 5.4 Naměřené hodnoty tlakových ztrát

V [ $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ]	$\Delta p$ [Pa] analyticky	$\Delta p$ [Pa] numericky
$7,55 \times 10^{-4}$	1517	1904
$7,74 \times 10^{-4}$	1594	2011
$8,01 \times 10^{-4}$	1704	2154
$8,35 \times 10^{-4}$	1855	2345
$8,61 \times 10^{-4}$	1972	2474
$8,82 \times 10^{-4}$	2068	2608
$9,17 \times 10^{-4}$	2237	2820
$9,34 \times 10^{-4}$	2322	2917
$9,55 \times 10^{-4}$	2427	3068

Tabulka 5.5 Vypočtené hodnoty tlakových ztrát

Data vynesena do grafu:



Obrázek 5.24 Graf tlakových ztrát ve fotobioreaktoru

Na základě analýzy dat jsem vyloučil z prvního měření hodnoty tlakových ztrát pro průtoky  $7,55 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $8,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , z druhého měření jsem vyloučil hodnoty tlakových ztrát pro malé průtoky  $4,62 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  až  $6,61 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a pro nejvyšší průtok  $10,94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Všechny naměřené hodnoty splňují kritéria Dean-Dixonova testu pro hodnotu spolehlivosti 95 %.

## 5.4 Zhodnocení tlakové ztráty

Z porovnání naměřených a vypočtených dat je patrné, že se jednotlivé hodnoty od sebe liší. Jelikož velikost tlakové ztráty při proudění uzavřeným prostorem závisí na druhé odmocnině rychlosti proudění, viz kapitola 5.2, která je lineárně závislá na velikosti objemového průtoku, proložil jsem naměřená data mocninou spojnicí trendu.



Rovnice spojnic trendů pro jednotlivá data jsou:

naměřené hodnoty (1. měření)	$\Delta p = 898 \times 10^6 \times V^{1,7886}$
naměřené hodnoty (2. měření)	$\Delta p = 4\,473 \times 10^6 \times V^{2,0360}$
vypočtené hodnoty numericky	$\Delta p = 3\,425 \times 10^6 \times V^{2,0031}$
vypočtené hodnoty analyticky	$\Delta p = 2\,653 \times 10^6 \times V^{1,9997}$

**Tabulka 5.6 Rovnice spojnic trendů dat**

Na základě předpokladů uvedených výše by měla měly spojnice trendů mít tvar:

$$\Delta p = a * \dot{V}^2 \quad (5.59)$$

Tomuto předpokladu se blíží, kromě naměřených hodnot při prvním měření, všechna data. Následující tabulka zobrazuje průměrný procentuální podíl vypočtených hodnot numerickou a analytickou metodou z naměřených dat při prvním a druhém měření.

vypočtené/naměřené	měření číslo 1	měření číslo 2
numerický výpočet	84 %	97 %
analytický výpočet	67 %	77 %

**Tabulka 5.7 Průměrný procentuální podíl vypočtených a na naměřených hodnot**

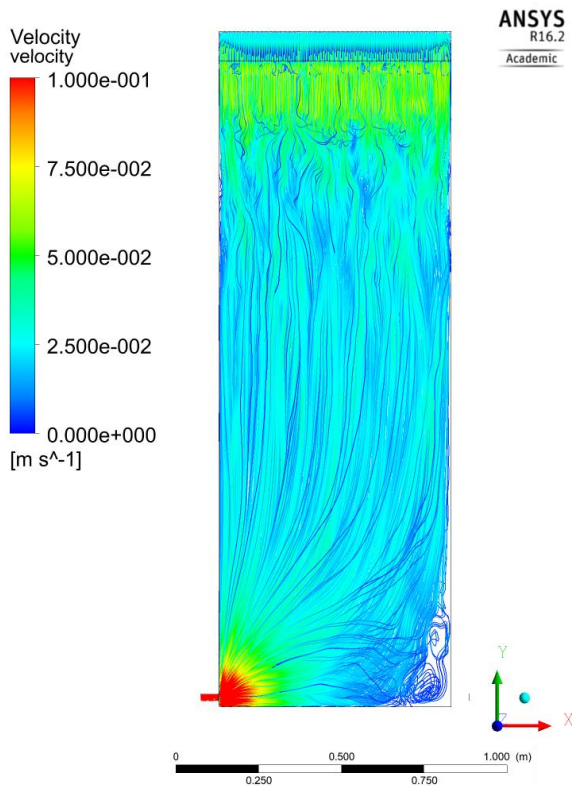
Z grafu, viz obrázek 5.24, a tabulky výše je patrné, že hodnoty z druhého měření jsou téměř totožné s hodnotami vypočtenými numerickou metodou. Hodnoty z prvního měření se od vypočtených hodnot liší více. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena tím, že v sítku průtokoměru byla zachycena plastová špona, kterou jsme našli a odstranili při údržbě před druhým měřením. Při konzultaci s výrobcem jsme dospěli k závěru, že nečistota zachycená v průtočném profilu elektromagnetického snímače průtokoměru může ovlivnit měřenou hodnotu průtoku média a je tedy možné, že průtokoměr při prvním měření zobrazoval nižší průtok média, než jaký skutečně byl. To by vysvětlovalo, proč se naměřené hodnoty z prvního měření tak výrazně liší od hodnot z druhého měření, i když by měly být stejné, a proč je exponent mocninné spojnice trendu jiný než dva. Z výše uvedených důvodů uvažuji za platné hodnoty pouze hodnoty získané druhým měřením a jelikož se od nich hodnoty tlakových ztrát liší v průměru jen o 3 %, lze CFD model fotobioreaktoru, jehož výsledky jsou prezentovány níže, považovat za ověřený a platný. Hodnoty získané analytickým výpočtem se liší více, jelikož při jejich výpočtu bylo provedeno mnoho zjednodušujících předpokladů.

## 5.5 Analýza proudění fotobioreaktorem

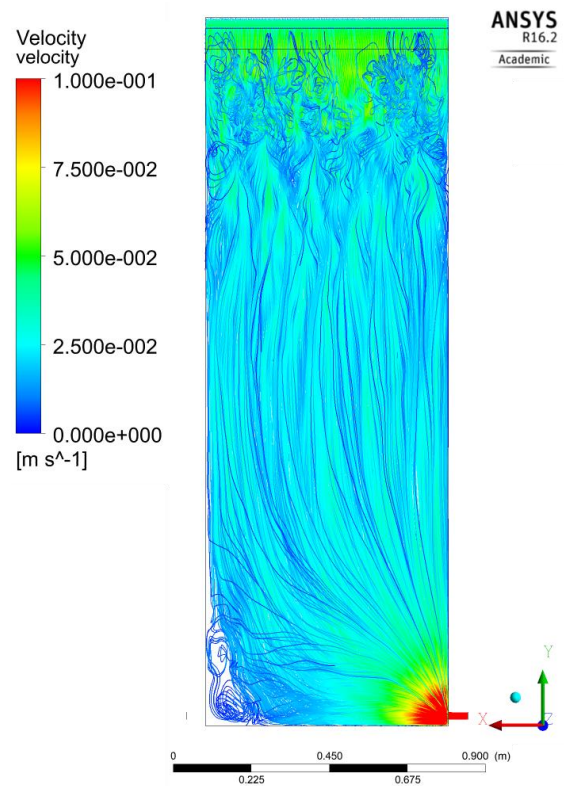
Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2, proudění média fotobioreaktorem by mělo být takové, aby nedocházelo k nežádoucímu usazování mikrořas na stěny fotobioreaktoru. Smykové napětí na stěně by mělo být v řádu jednotek pascalů, proudění by mělo být turbulentní a při průtoku

fotobioreaktorem by neměla vznikat hluchá místa a víry. V programu Ansys Fluent byla provedena analýza proudění. Nastavení výpočtového modelu je shodný s výpočtem tlakové ztráty, viz výše.

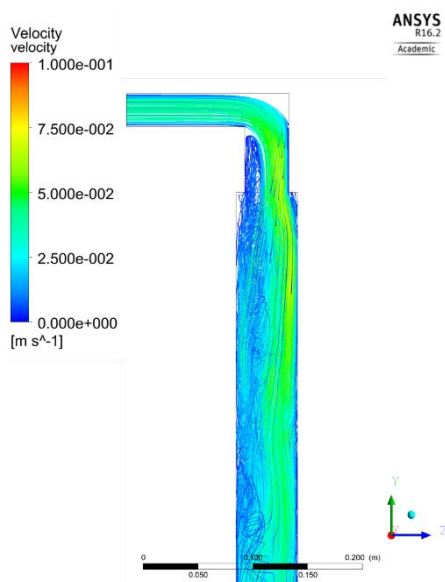
Proudnice znázorňují rychlost a směr proudění prostorem fotobioreaktoru:



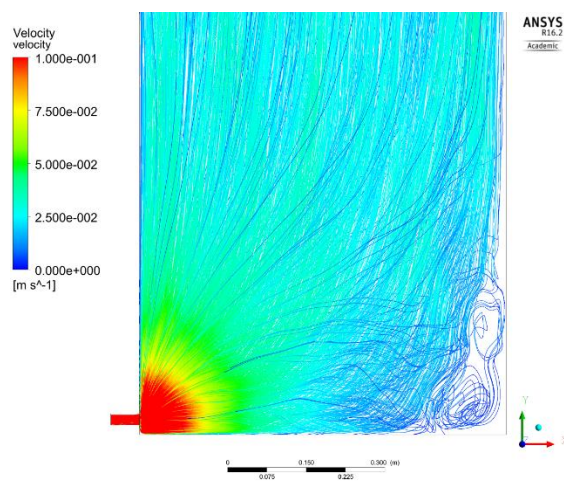
Obrázek 5.25 Fotobioreaktor proudnice (vnější), Ansys Fluent



Obrázek 5.26 Fotobioreaktor proudnice (vnitřní), Ansys Fluent



Obrázek 5.27 Fotobioreaktor proudnice (nátok), Ansys Fluent

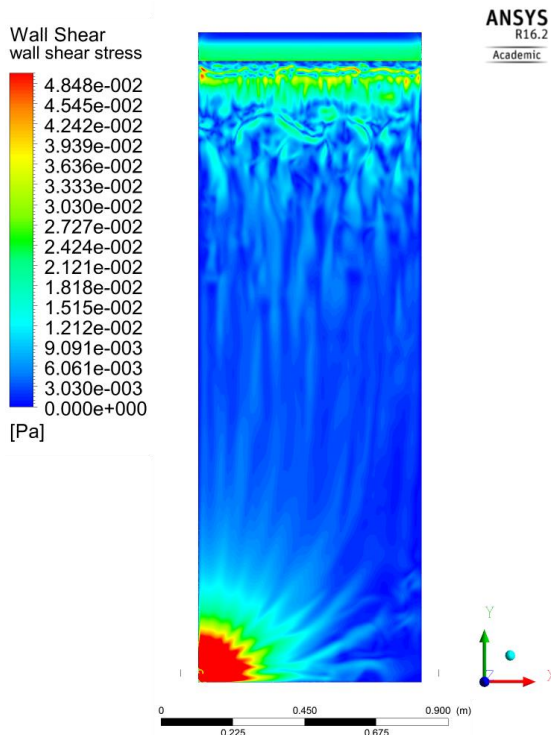


Obrázek 5.28 Fotobioreaktor proudnice (výtok), Ansys Fluent

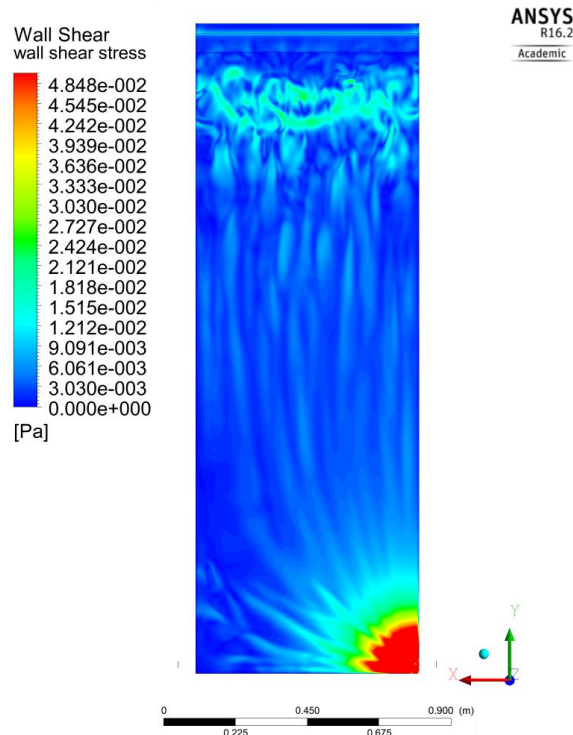
Z obrázků výše je patrné, že ve fotobioreaktoru dochází k nerovnoměrnému proudění, které je způsobené excentricky umístěným výtokovým otvorem. Vlivem nerovnoměrného proudění vznikají

hluchá místa proudění a tvoří se víry, viz obrázek 5.28. K tvorbě vírů dochází také u nátoku na vnitřní straně fotobioreaktoru, více obrázek 5.27. Jak bylo uvedeno výše, tvorba vírů a nerovnoměrné oplachování stěny fotobioreaktoru je nežádoucí z důvodu zvýšené sedimentace mikrořas.

Smykové napětí na stěně fotobioreaktoru:



Obrázek 5.29 Smykové napětí na stěně fotobioreaktor (vnější), Ansys Fluent



Obrázek 5.30 Smykové napětí na stěně fotobioreaktor (vnitřní), Ansys Fluent

Z obrázků výše je patrné, že smykové napětí na stěně fotobioreaktoru se pohybuje v rozmezí  $0 - 3 \times 10^{-2}$  Pa, tedy výrazně pod požadovanou hodnotou pro zamezení usazování buněk mikrořas. Smykové napětí by bylo teoreticky možné zvýšit zvýšením objemového průtoku média, tím bychom se také mohli dostat z oblasti přechodového proudění do oblasti turbulentního proudění, viz kapitola 5.1. Objemový průtok média je ale neměnný z důvodu požadované doby zdržení média v prostoru fotobioreaktoru pro správný průběh kultivace mikrořas. Dalším řešením by bylo použití vestaveb, které by v prostoru fotobioreaktoru vytvořily meandry, a tím by došlo ke snížení průtočného průřezu a zvýšení rychlosti proudění při zachování konstantního objemového průtoku a doby zdržení. Zvýšením rychlosti proudění média dojde ke zvýšení Reynoldsova čísla, viz rovnice (5.3) a ke zvýšení smykového napětí na stěně, pro které obecně platí vztah:

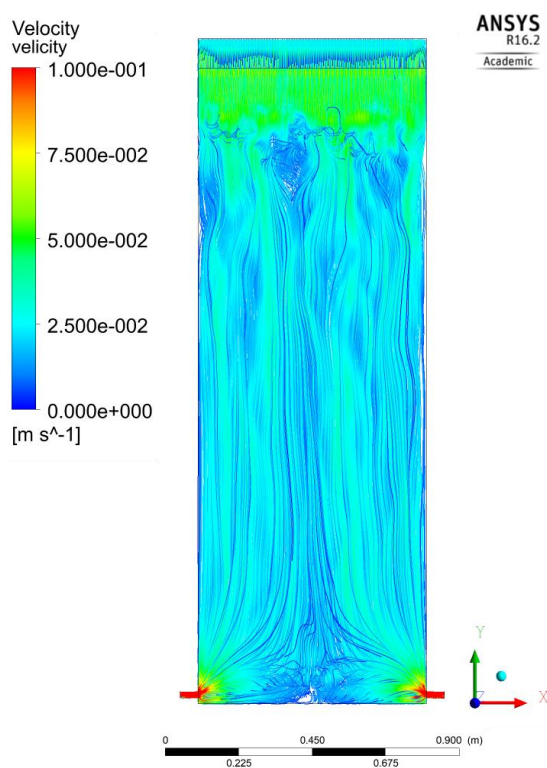
$$\tau = \mu * \frac{du}{dy} \quad (5.60)$$

kde  $\tau$  [Pa] je hodnota smykového napětí,  $\mu$  [Pa s] je dynamická viskozita a  $u$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] je rychlost proudění média v průřezu. Třetí možností, jak zabránit usazování mikrořas, je pomocí kontinuální nebo periodické aerace média vzduchem pomocí děrovaných trubek umístěných ve spodní části fotobioreaktoru. Jedná se o jednoduchý a účinný princip, který kromě zamezení usazování mikrořas

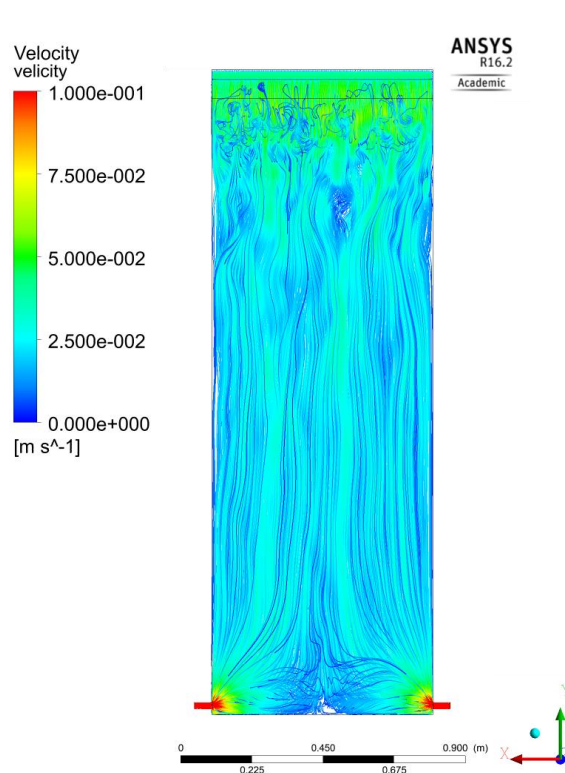
na stěny fotobioreaktoru zajistí i částečné promíchání kapaliny a homogenizaci. Nevýhodou ale je, že vzduch obsahuje kyslík, který má neblahý vliv na průběh fotosyntézy, musí proto být dobře vyřešeno odvětrání fotobioreaktoru, viz patentová řešení.

## 5.6 Optimalizace proudění fotobioreaktorem

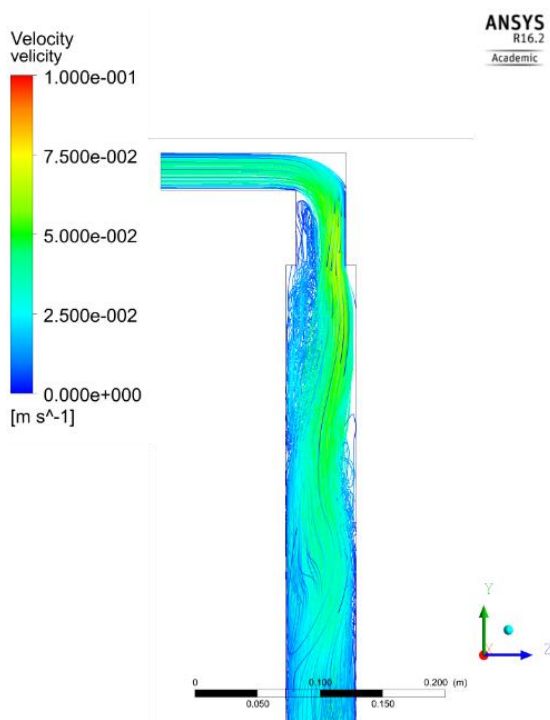
Pro efektivní pěstování mikrořas je nutné, aby bylo proudění fotobioreaktorem co nejrovnoměrnější. To ale současné zapojení neumožňuje kvůli excentricky umístěnému výtakovému otvoru. Jednou z možností, jak zlepšit charakter proudění fotobioreaktorem, je zapojit i druhý výtakový otvor H2, který byl původně zamýšlen pro propojení výtoků jednotlivých fotobioreaktorů umístěných v rámu do série, viz příloha 1. Výpočtový model je shodný s předchozím případem. Výsledné proudnice pro dva výtakové otvory:



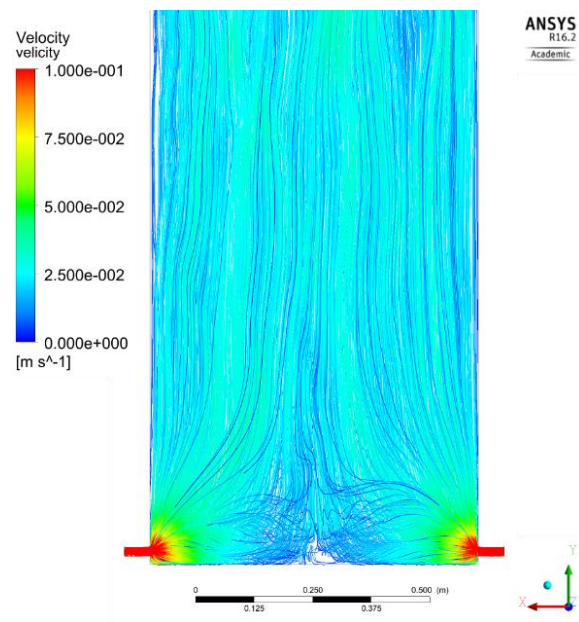
Obrázek 5.31 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (vnější), Ansys Fluent



Obrázek 5.32 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (vnitřní), Ansys Fluent



Obrázek 5.33 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (nátok), Ansys Fluent

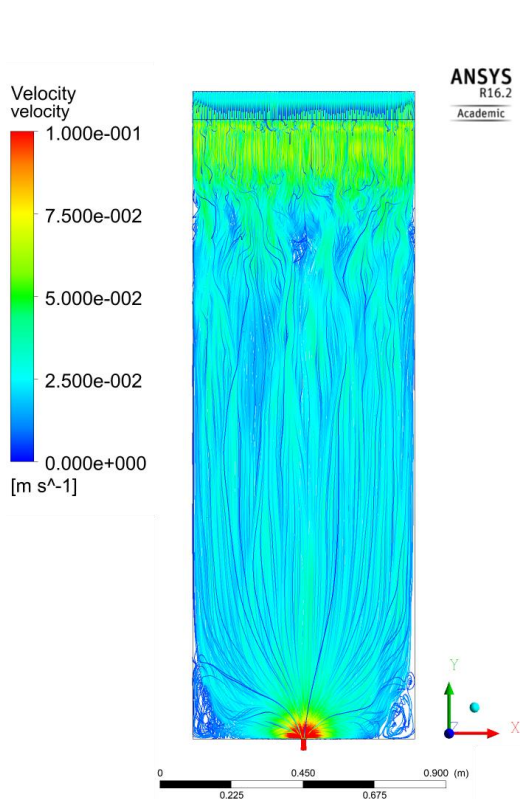


Obrázek 5.34 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (výtok), Ansys Fluent

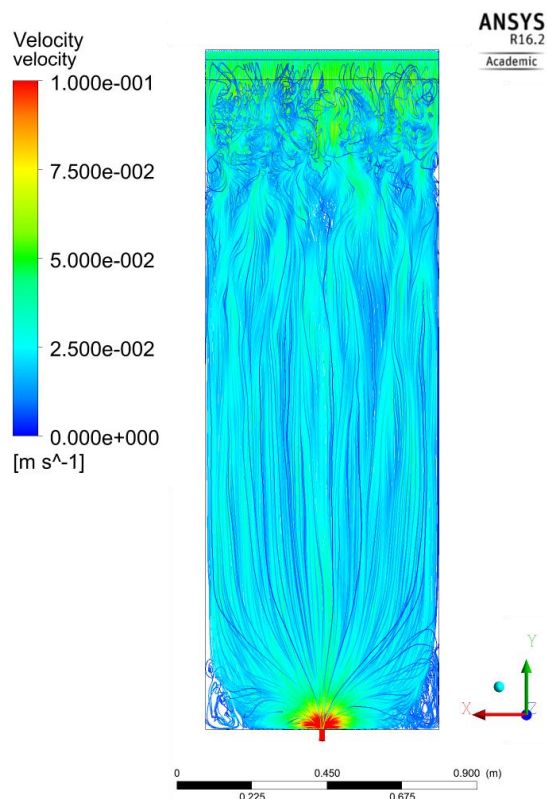
Z obrázků je vidět, že při zapojení dvou výtokových otvorů je proudění oproti předchozímu stavu více rovnoměrné. Pouze dochází k mírnému víření u dna nádoby.

Dalším možným řešením tohoto problému je použít místo stávajícího výtokového otvoru hrdlo H4, viz příloha 1, které je umístěno ve středu dna nádoby a je primárně určeno k aeraci prostoru fotobioreaktoru. V tomto případě by muselo dojít k drobným úpravám, protože toho hrdlo je zapuštěné do prostoru fotobioreaktoru, což by při proudění média do výstupní trubky způsobovalo velkou tlakovou ztrátu a vytvářelo velké množství hluchých míst u dna nádrže. Pokud by se ale zapuštěná část trubky seřízla do roviny s nádrží, mohla by sloužit jako výstupní hrdlo bez problému. Výpočtový model je shodný s předchozím případem. Výsledné proudnice pro výtok aeračním hrdlem:

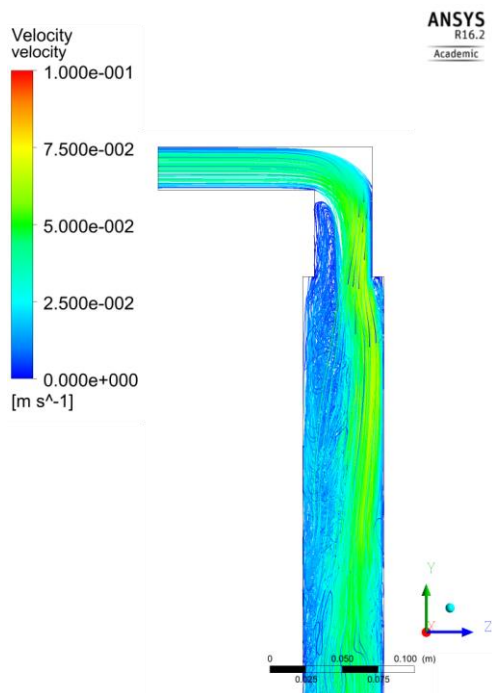




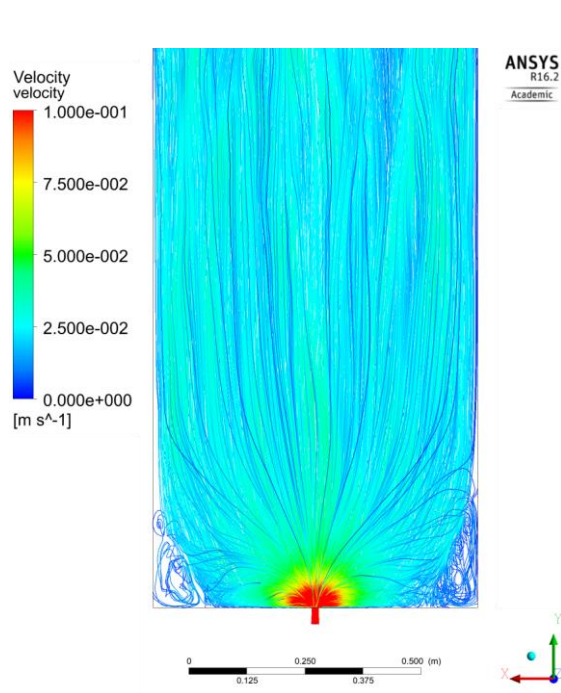
Obrázek 5.35 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (vnější), Ansys Fluent



Obrázek 5.36 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (vnitřní), Ansys Fluent



Obrázek 5.37 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (nátok), Ansys Fluent



Obrázek 5.38 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (Výtok), Ansys Fluent

Z obrázků výše je vidět, že proudění při tomto zapojení je také více rovnoměrné než původní návrh. Oproti návrhu výtoky dvěma otvory zde dochází k tvorbě hluchých míst v rozích u dna nádrže, viz obrázek 5.38. Další možností, jak dosáhnout ideálního toku média, je použít vhodně volené vestavby do prostoru fotobioreaktoru, které budou sloužit k lepší disperzi proudění média.

## 6 Závěr

Tématem této práce bylo zpracovat rešerši zaměřenou na konstrukci a provozování deskových fotobioreaktorů. Dalším úkolem bylo navrhnout vhodnou konstrukci deskového fotobioreaktoru, provést potřebné pevnostní výpočty, zpracovat výrobní dokumentaci a zprovoznit zařízení. Dále měly být na skutečném zařízení stanovené analyticky a experimentálně hydraulické charakteristiky komory fotobioreaktoru, získaná data měla být použita pro validaci CFD modelu fotobioreaktoru.

V rámci práce jsem dosáhl těchto výsledků:

- diskutoval jsem současné možnosti pěstování mikrořas, představil jsem základní typy nádrží a fotobioreaktorů s jejich výhodami a nevýhodami
- uvedl jsem možnosti získání oxidu uhličitého pro pěstování mikrořas
- provedl jsem ekonomickou analýzu pěstování mikrořas spolu s představením hlavních produktů, které lze z mikrořas produkovat, a rentabilitu jejich produkce
- pomocí patentové rešerše jsem analyzoval současný trend ve vývoji deskových fotobioreaktorů a analyzoval jsem klíčové problémy, kterým je nutné se při návrhu deskových fotobioreaktorů věnovat
- uvedl jsem příklad využití deskového fotobioreaktoru v průmyslu
- na základě informací získaných patentovou a průmyslovou rešerší jsem uvedl vlastní poznatky a doporučení při konstrukci deskových fotobioreaktorů
- pomocí pevnostní kontroly jsem analyzoval nedostatky původního návrhu fotobioreaktoru
- předvedl jsem konstrukční návrhy, které by splňovaly požadované vlastnosti fotobioreaktoru a které by splňovaly pevnostní podmínku
- porovnáním výhod a nevýhod jednotlivých návrhů jsem vybral vhodnější řešení a provedl konstrukční návrh
- na základě výrobního výkresu bylo zařízení vyrobeno, následně jsme provedli montáž a zařízení zprovoznili
- provedl jsem analytický a numerický výpočet tlakové ztráty v prostoru fotobioreaktoru
- změřili jsme skutečnou tlakovou ztrátu v zařízení
- porovnáním naměřených a vypočtených hodnot, kdy průměrný rozdíl mezi hodnotami vypočtenými numericky a experimentálně změřenými byl 3 %, jsem byl schopen validovat CFD model
- na základě validovaného CFD modelu jsem analyzoval problémy, ke kterým by mohlo docházet při provozování fotobioreaktoru, a navrhl jsem řešení těchto problémů
- provedl jsem návrh optimalizace proudění při použití záložních hrdel pro výtok média z fotobioreaktoru

Osobně si myslím, že pěstování mikrořas má velký ekonomický i enviromentální potenciál. Fotobioreaktory, a hlavně deskové fotobioreaktory, se v současnosti jeví jako ideální volba pro kultivaci mikrořas. Jsem skeptický k názoru, že by mikrořasy mohly nahradit ropu jako suroviny pro výrobu motorové nafty. Obzvlášť s ohledem na současný vývoj v automobilovém průmyslu, kdy je ze strany vlád hlavních světových ekonomik kladen silný nátlak na vytlačení naftových motorů z trhu. Dalším problémem je rentabilita výroby bionafty, protože v současné době je cena výroby bionafty z mikrořas několikanásobně vyšší než prodejní cena ropné nafty. Na rozdíl od biopaliv vidím velmi pozitivně potenciál mikrořas pro výrobu potravinových doplňků či léčiv, jejichž prodejní cena je výrazně vyšší s ohledem na množství zpracované biomasy a již v současnosti existují společnosti, které za tímto účelem mikrořasy pěstují a zpracovávají.

Fotobioreaktor je navržený tak, aby jeho vnitřní objem byl shodný s vnitřním objemem původní verze fotobioreaktoru pro zachování shodných procesních parametrů. Rám fotobioreaktoru je oproti původní verzi vyroben ze svařovaných profilů, původní verze byla vyrobena z ohýbaných plechů, které se následně nežádoucím způsobem zkroutily. PMMA desky jsou u nové verze vyztuženy přítláčným rámem, který zaručí lepší přenos napětí, které samotná PMMA deska není schopna přenést. Těsnost fotobioreaktoru byla ověřena opakovaným napouštěním nádrže vodou. Fotobioreaktor bude dále sloužit v laboratořích pro vědecké účely v oblasti kultivace mikrořas a modifikace proudění ve fotobioreaktoru.



# Seznam symbolů

a	[m]	parametr délky
b	[m]	parametr délky
d	[m]	průměr / hydraulický průměr
$e_z$	[m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]	ztráta energie
F	[N]	síla
g	[m s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška vodního sloupce
H	[m]	výška vodního sloupce (výpočtová, celková)
k	[m]	absolutní drsnost potrubí
k*	[-]	relativní drsnost potrubí
l	[m]	délka
O	[m]	obvod
p	[Pa]	tlak
$\Delta p$	[Pa]	tlaková ztráta / tlaková diference
r	[m]	poloměr
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
u	[m s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění
V	[m <sup>3</sup> ]	objem (objemový průtok [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ])
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok
x	[m]	výška vzpěry

## Řecké symboly

$\zeta$	[-]	součinitel místních ztrát
$\lambda$	[-]	součinitel třecích ztrát
$\mu$	[Pa s]	dynamická viskozita
$\rho$	[kg m <sup>-3</sup> ]	hustota
$\tau$	[Pa]	smykové napětí

# Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Nemíchaná nádrž, kruhová míchaná nádrž, korytový systém (Razzak et al., 2013) .....	8
Obrázek 1.2 Trubkový fotobioreaktor (Greenwell et al., 2010).....	9
Obrázek 1.3 Deskový fotobioreaktor (Bělohav et al., 2017) .....	9
Obrázek 1.4 Válcový fotobioreaktor (Bělohav et al., 2017) .....	10
Obrázek 1.5 Separace oxidu uhličitého, PDF (Červený, 2018b) .....	12
Obrázek 1.6 Víceproduktová biorafinerie (Dong et al., 2016).....	15
Obrázek 1.7 Produkty a jejich ekonomická hodnota (Červený, 2016) .....	16
Obrázek 1.8 Mikrořasy pro úpravu vody (Ziolkowska a Simon, 2013).....	17
Obrázek 2.1 Teoretická produkce řas na jeden hektar (Bělohav et al., 2017) .....	18
Obrázek 2.2 Vybrané typy fotobioreaktorů v nových patentech (Žáková et al., 2018) .....	18
Obrázek 2.3 Boční pohled, podpěrné profily instalované na sloupcupcích (Levin, 2014) .....	19
Obrázek 2.4 Průřez fotobioreaktorem (Levin, 2014) .....	20
Obrázek 2.5 Vrchní pohled (Levin, 2014) .....	20
Obrázek 2.6 Přípojná místa fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010) .....	21
Obrázek 2.7 Příklad geometrického uspořádání (Hu a Summerfeld, 2010) .....	21
Obrázek 2.8 Řešení vrchní části fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010) .....	22
Obrázek 2.9 Aerace fotobioreaktoru (Hu a Summerfeld, 2010) .....	23
Obrázek 2.10 Fotobioreaktor, přepážky (Hu a Summerfeld, 2010).....	23
Obrázek 2.11 Struktura stěny fotobioreaktoru (Ahn et al., 2012).....	24
Obrázek 2.12 Řez fotobioreaktorem, struktura stěn (Ahn et al., 2012) .....	25
Obrázek 2.13 Řez fotobioreaktorem, hydrostatický přetlak (Ahn et al., 2012) .....	25
Obrázek 2.14 Lom světla deskou fotobioreaktoru (Ahn et al., 2012) .....	26
Obrázek 2.15 Další způsob osvětlení fotobioreaktoru (Friederich et al., 2017) .....	26
Obrázek 2.16 Vliv orientace deskových fotobioreaktorů (Bosma et al., 2012) .....	27
Obrázek 2.17 Proces kultivace mikrořas, Bonaloka (Bonaloka, 2018).....	28
Obrázek 2.18 Fotobioreaktor pro pěstování mikrořas, Bonaloka (Bonaloka, 2018).....	29
Obrázek 2.19 Průřez fotobioreaktorem, Subitec (Subitec, 2018).....	29
Obrázek 2.20 Příklad vnitřních vyztužovacích prvků (Syndebio, 2018) .....	31
Obrázek 2.21 Příklad vnějších vyztužovacích prvků (Doga limited, 2018) .....	31
Obrázek 3.1 Fotobioreaktor, původní návrh (vizualizace).....	33
Obrázek 3.2 Fotobioreaktor, původní návrh, netěsnosti .....	33
Obrázek 3.3 Fotobioreaktor, původní návrh, netěsnosti .....	33
Obrázek 3.4 Pevnostní analýza původního návrhu (Ansys Static Structural).....	35
Obrázek 3.5 Deformační analýza původního návrhu (Ansys Static Structural) .....	36
Obrázek 3.6 Varianta (A) - vlevo, varianta (B) - vpravo .....	37
Obrázek 3.7 Pevnostní analýza varianta (A) (Ansys Static Structural) .....	37

Obrázek 3.8 Deformační analýza varianta (A) (Ansys Static Structural) .....	38
Obrázek 3.9 Pevnostní analýza varianta (B) (Ansys Static Structural).....	38
Obrázek 3.10 Deformační analýza varianta (B) (Ansys Static Structural) .....	39
Obrázek 3.11 Vnitřní rozměry fotobioreaktoru (Červený, 2018a).....	40
Obrázek 3.12 Umístění výztuh pro rozložení tlaku.....	41
Obrázek 3.13 Namáhání výztuh.....	42
Obrázek 4.1 Fotobioreaktor, dodání.....	43
Obrázek 4.2 Fotobioreaktor, osazení armaturami .....	43
Obrázek 4.3 Fotobioreaktor, osazování .....	43
Obrázek 4.4 Fotobioreaktor, montáž.....	44
Obrázek 4.5 Fotobioreaktor umístěný na rám (vizualizace) .....	44
Obrázek 4.6 Praskliny, PMMA deska (a) .....	45
Obrázek 4.7 Praskliny, PMMA deska (b) .....	45
Obrázek 4.8 Strojně technologické schéma, zapojení fotobioreaktoru .....	45
Obrázek 5.1 Fotobioreaktor schématický pohled (vizualizace) .....	48
Obrázek 5.2 Segmenty fotobioreaktor (Červený, 2018a) .....	49
Obrázek 5.3 Rozměry vstupního hrdla (Červený, 2018a).....	49
Obrázek 5.4 Moodyho diagram (Diagram site, 2018) .....	50
Obrázek 5.5 Ostré koleno (Červený, 2018a).....	51
Obrázek 5.6 Závislosti místních ztrát na geometrii kolena .....	51
Obrázek 5.7 Rozměry neosvícené části (Červený, 2018a).....	52
Obrázek 5.8 Rozšíření (Červený, 2018a).....	52
Obrázek 5.9 Rozměry osvícené části fotobioreaktoru (Červený, 2018a).....	53
Obrázek 5.10 Rozměr výtokového otvoru .....	54
Obrázek 5.11 Vnitřní rozměry rozvaděče .....	55
Obrázek 5.12 Segmenty rozvaděč .....	55
Obrázek 5.13 Rozšíření, nátok do nádrže .....	56
Obrázek 5.14 Rozměry rozvaděče, zjednodušené.....	56
Obrázek 5.15 Výstupní hrdlo, rozměry .....	57
Obrázek 5.16 Fotobioreaktor geometrie, Ansys (Červený, 2018a).....	58
Obrázek 5.17 Fotobioreaktor síťování, Ansys (Červený, 2018a) .....	59
Obrázek 5.18 Výpočet proudění, reziduální křivky fotobioreaktor, Ansys Fluent .....	59
Obrázek 5.19 Tlaková ztráta Fotobioreaktor, výpis Ansys Fluent.....	60
Obrázek 5.20 Rozvaděč geometrie, Ansys .....	60
Obrázek 5.21 Rozvaděč síťování, Ansys .....	60
Obrázek 5.22 Výpočet proudění, reziduální křivky rozvaděč, Ansys Fluent.....	61
Obrázek 5.23 Tlaková ztráta rozvaděč, výpis Ansys Fluent .....	61
Obrázek 5.24 Graf tlakových ztrát ve fotobioreaktoru .....	63

Obrázek 5.25 Fotobioreaktor proudnice (vnější), Ansys Fluent .....	65
Obrázek 5.26 Fotobioreaktor proudnice (vnitřní), Ansys Fluent .....	65
Obrázek 5.27 Fotobioreaktor proudnice (nátok), Ansys Fluent.....	65
Obrázek 5.28 Fotobioreaktor proudnice (výtok), Ansys Fluent.....	65
Obrázek 5.29 Smykové napětí na stěně fotobioreaktor (vnější), Ansys Fluent .....	66
Obrázek 5.30 Smykové napětí na stěně fotobioreaktor (vnitřní), Ansys Fluent .....	66
Obrázek 5.31 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (vnější), Ansys Fluent .....	67
Obrázek 5.32 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (vnitřní), Ansys Fluent .....	67
Obrázek 5.33 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (nátok), Ansys Fluent .....	68
Obrázek 5.34 Fotobioreaktor proudnice, dva výtoky (výtok), Ansys Fluent.....	68
Obrázek 5.35 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (vnější), Ansys Fluent.....	69
Obrázek 5.36 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (vnitřní), Ansys Fluent .....	69
Obrázek 5.37 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (nátok), Ansys Fluent .....	69
Obrázek 5.38 Fotobioreaktor proudnice, aerační výtok (Výtok), Ansys Fluent .....	69

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Způsoby pěstování mikrořas (Borowitzka, 1998).....	7
Tabulka 1.2 Orientační emisní hodnoty tepelných elektráren.....	11
Tabulka 1.3 Maximální koncentrace CO <sub>2</sub> pro kultivaci vybraných řas (Oilgae, 2018) .....	12
Tabulka 1.4 Produkty z mikrořas, náhrada za fosilní paliva, cena (National Coal Council, 2016) .	14
Tabulka 1.5 Produkty z mikrořas, potraviny a cenné látky, cena (National Coal Council, 2016)...	14
Tabulka 1.6 Teoretický ekonomický zisk z jednotky mikrořas .....	14
Tabulka 3.1 Fyzikální vlastnosti materiálů .....	35
Tabulka 3.2 Výhody a nevýhody variant řešení.....	39
Tabulka 4.1 Tabulka hrdel, zadržovací nádoba.....	46
Tabulka 4.2 Tabulka hrdel, fotobioreaktor.....	46
Tabulka 4.3 Soupis komponent.....	46
Tabulka 5.1 Hodnoty absolutních drsností pro materiály (Červený, 2018a) .....	49
Tabulka 5.2 Fyzikální vlastnosti vody (Červený, 2018a) .....	49
Tabulka 5.3 Nastavení výpočtů, Ansys Fluent (Červený, 2018a).....	59
Tabulka 5.4 Naměřené hodnoty tlakových ztrát .....	62
Tabulka 5.5 Vypočtené hodnoty tlakových ztrát .....	62
Tabulka 5.6 Rovnice spojnic trendů dat.....	64
Tabulka 5.7 Průměrný procentuální podíl vypočtených a na naměřených hodnot .....	64

# Seznam literatury

ADENIYI, Oladapo Martins, Ulugbek AZIMOV a Alexey BURLUKA. Algae biofuel: Current status and future applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, 316-335. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.067. ISSN 13640321.

AHN, Dong Gyu, Yeong Su AHN, Sanghwa CHUNG, Jong Rak BAK, Jeongu BAK a Jongtae KIM. Flat panel photobioreactor with high rigidity and multiple light reflector. Republic of Korea. KR 101207475 B1. Uděleno 3.12.2012.

Algae world news [online]. 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://news.algaeworld.org/2017/06/czechs-astaxanthin-producer-algamo-utilizes-subitecs-fpa-photobioreactors/>

BĚLOHLAV, Vojtěch, Tomáš JIROUT a Lukáš KRÁTKÝ. Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. *Sborník příspěvků TVIP 2017. Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí – TVIP 2017. Hustopeče, 21.03.2017 - 23.03.2017. Praha: CEMC – České ekologické manažerské centrum*. 2017, ISBN 978-80-85990-30-0.

BIOMACH. *Výpisky z biologie*[online]. [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.biomach.cz/biologie-rostlin/fotosynteza>

Doga limited. *BIOTRON Plate Photo Bioreactor* [online]. [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.dogalimited.com/en/product/biotron-plate-photo-bioreactor>

Bonaloka [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.bonaloka.cz>

BOROWITZKA, Michael A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*. 1998, 313-321.

BOSMA, Rouke, Dorinde KLEINEGRIS, Maria BARBOSA a René WIJFFELS. Exploring scale-up challenges in microalgae mass production. *Algae workshop*. 2012.

BRENNAN, Liam a Philip OWENDE. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, 557-577. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.009. ISSN 13640321.

BYRTUSOVÁ, Dana. *Optimalizace podmínek kultivace řasových kultur ve fotobioreaktorech*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Radka Kočí.

CUARESMA, María, Marcel JANSSEN, Carlos VÍLCHEZ a René H. WIJFFELS. Horizontal or vertical photobioreactors? How to improve microalgae photosynthetic efficiency. *Bioresource Technology*. 2011, 5129-5137. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.078. ISSN 09608524.

ČERVENÝ, Jakub. *Analýza proudění ve fotobiorektoru*. Praha, 2018a. Semestrální práce. České vysoké učení technické v Praze.

ČERVENÝ, Jakub. *Moderní biorařinerie*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Lukáš Krátký.

ČERVENÝ, Jakub. *Modernizace uhelné elektrárny o zařízení na separaci oxidu uhličitého a jeho využití*. Praha, 2018b. Semestrální práce. České vysoké učení technické v Praze.

Diagram Site [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.printablediagram.com>

Domacitechnika. *Návod na skladování, zpracování, montáži plných PMMA desek Marcryl FS, Palglas (PMMA – plexisklo)* [online]. [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: [https://www.domacitechnika.cz/pdf/montazni\\_navod\\_2009\\_marcryl\\_FS.pdf](https://www.domacitechnika.cz/pdf/montazni_navod_2009_marcryl_FS.pdf)

DONG, Tao, Eric P. KNOSHAUG, Ryan DAVIS, Lieve M.L. LAURENS, Stefanie VAN WYCHEN, Philip T. PIENKOS a Nick NAGLE. Combined algal processing: A novel integrated biorefinery process to produce algal biofuels and bioproducts. *Algal Research*. 2016, 316-323. DOI: 10.1016/j.algal.2015.12.021. ISSN 22119264

DOUCHA, Jiří, František STRAKA a Karel LÍVANSKÝ. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae *Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*. 2005, 403-412. DOI: 10.1007/s10811-005-8701-7. ISSN 0921-8971.

DUBOIS, Lionel a Diane THOMAS. Study of the Postcombustion CO<sub>2</sub> Capture by Absorption into Amine(s) Based Solvents: Application to Cement Flue Gases. *Energy Procedia*. 2013, 37, 1639-1647. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.039. ISSN 18766102.

EIGA.ORG. *Vlivy výroby oxidu uhličitého a suchého ledu na životní prostředí*. EIGA, 2002. Dostupné také z: <http://www.eiga.org>

FRIEDERICH, Alain, Michael CONIN, Gael RUIZ a Mahmoud AFFI. *Photobioreactor in a closed environment for the culture of photosynthetic microorganisms*. United States. Patent Application Publication. US 2017/0101611 A1. Uděleno 13.4.2017. Zapsáno 16.12.2016.

Global CCS, Module 2 CO<sub>2</sub> capture: Post combustion flue gas separation. *Global CCS Institute* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.globalccsinstitute.com>

GREENWELL, H. C., L. M. L. LAURENS, R. J. SHIELDS, R. W. LOVITT a K. J. FLYNN. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of The Royal Society Interface*. 2010, 703-726. DOI: 10.1098/rsif.2009.0322. ISSN 1742-5689.

HAUCK, John T., Grefory J. OLSON, Stephanie J. SCIERKA, Mildred B. PERRY a Mohammad M. ATAAI. Effects of simulated flue gas on growth of microalgae. *Abstracts of Papers. American Chemical Society, 212 Meeting, Pt.1, Fuel 118. Orlando, FL, 25–29 August 1996*.

HU, Qiang a Milton SUMMERFELD. *Photobioreactor and uses therefor*. United States. Patent Application Publication. US 2010/0028976 A1. Uděleno 4.2.2010. Zapsáno 20.2.2007.

HUERTAS, José I., Martin D. GOMEZ, Nicolas GIRALDO a Jessica GARZÓN. CO<sub>2</sub> Absorbing Capacity of MEA. *Journal of Chemistry*. 2015, 1-7. DOI: 10.1155/2015/965015. ISSN 2090-9063.

CHAGAS, A.L., A.O. RIOS, A. JARENKOW, N.R. MARCÍLIO, M.A.Z. AYUB a R. RECH. Production of carotenoids and lipids by *Dunaliella tertiolecta* using CO<sub>2</sub> from beer fermentation. *Process Biochemistry*. 2015, 981–988. DOI: 10.1016/j.procbio.2015.03.012. ISBN 13595113

LEVIN, Alexander. *Photobioreactor*. United States. Patent Application Publication. US 2014/0093950 A1. Uděleno 3.4.2014. Zapsáno 3.10.2012.

MASOJÍDEK, Jiří, Richard LHOTSKÝ, Jiří KOPECKÝ a Ondřej PRÁŠIL. Mikrořasy - solární továrna v jedné buňce. *Věda kolem nás, výzvy a otázky*. Středisko společných činností AV ČR, 2016. ISSN 2464-6245.

MICHELS, Michiel H. A., Atze JAN, Marian H. VERMUË a René H. WIJFFELS. Cultivation of shear stress sensitive and tolerant microalgal species in a tubular photobioreactor equipped with a centrifugal pump. *J Appl Phycol*. 2015, 53-62. DOI: DOI 10.1007/s10811-015-0559-8.

- NATIONAL COAL COUNCIL. *CO2 BUILDING BLOCKS Assessing CO2 Utilization Options*. report: National Coal Council, Washington, DC, 2016. Library of Congress Catalog # 2016951739.
- NEGORO, Masaaki, Norio SHIOJI, Kazuhisa MIYAMOTO a Yoshiharu MIURA. Growth of Microalgae in High CO2 Gas and Effects of SOx and NOx. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1991.
- NĚMEC, Jan. *Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Radek Dvořák.
- OILGAE. *Capture of CO2 Emissions Using Algae*. Oilgae. [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné také z: [http://www.oilgae.com/ref/downloads/Analysis\\_of\\_CO2\\_Capture\\_Using\\_Algae.pdf](http://www.oilgae.com/ref/downloads/Analysis_of_CO2_Capture_Using_Algae.pdf)
- PANIS, George a J. Rosales CARREON. Commercial astaxanthin production derived by green alga *Haematococcus pluvialis*: A microalgae process model and a techno-economic assessment all through production line. *Algal Research*. 2016, 175-190. DOI: 10.1016/j.algal.2016.06.007. ISSN 22119264.
- RAZZAK, Shaikh A., Mohammad M. HOSSAIN, Rahima A. LUCKY, Amarjeet S. BASSI a Hugo DE LASA. Integrated CO2 capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, 622-653. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.063. ISSN 13640321.
- RUPIPER, Amenda. Potential for biofuel production from algae based wastewater treatment in California: Can algal biofuels be cost-competitive with traditional petroleum based diesel?. 2016. Master Project. The University of San Francisco.
- Subitec [online]. [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://subitec.com/en>
- SyndeBio. *Synthetic design biotypes, The Algae House by SPLITTERWERK* [online]. [cit. 2018-06-14]. Dostupné z: <http://syndeBio.com/biq-algae-house-splitterwerk/>
- TESTO. Flue Gas Analysis in Industry: Practical guide for Emission and Process Measurements [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: [http://www.testo350.com/downloads/Flue\\_Gas\\_in\\_Industry\\_0981\\_2773.pdf](http://www.testo350.com/downloads/Flue_Gas_in_Industry_0981_2773.pdf)
- VÁVROVÁ, Karolína. *Životní cyklus zelené řasy Haematococcus pluvialis produkující astaxantin, podmínky kultivace a použitá kultivační média*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Yvonne Němcová.
- Vyhláška č. 415/2012 Sb., Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Sběrka zákonů, 2012. ISSN 1211-1244.
- WANG, Chinchin a Christopher Q. LAN. Effects of shear stress on microalgae – A review. *Biotechnology Advances*. 2018, 986-1002. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.03.001. ISSN 07349750.
- WICHTERLOVÁ, Jana, Václav ROUBÍČEK a Petr PÁNEK. Zachycování emisí CO2 z průmyslových zdrojů. *Chem. Listy*. 2008 (102), 500-505.
- ZIOLKOWSKA, Jadwiga R. a Leo SIMON. Recent developments and prospects for algae-based fuels in the US. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, 847-853. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.021. ISSN 13640321.

ZITTELLI, Graziella Chini, Liliana RODOLFI, Niccoló BASSI, Natascia BIONDI a Mario R. TREDICI. Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production. *Algae for Biofuels and Energy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, 115-131. DOI: 10.1007/978-94-007-5479-9\_7. ISBN 978-94-007-5478-2.

ŽÁKOVÁ, Terézia, Lukáš KRÁTKÝ a Tomáš JIROUT. *Technical study of pilot plant and industrial photobioreactors*. 6. mezinárodní chemicko-technologická konference, 2018. Odborný poster. České vysoké učení technické v Praze.

## Seznam příloh

Příloha číslo 1	Výrobní výkres fotobioreaktoru
Příloha číslo 2	CFD model (program: Ansys 16.2)
Příloha číslo 3	Pevnostní kontrola původního návrhu (program: Ansys 16.2)
Příloha číslo 4	Pevnostní kontrola varianty A (program: Ansys 16.2)
Příloha číslo 5	Pevnostní kontrola varianty B (program: Ansys 16.2)