



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

Aerace deskového fotobioreaktoru

Aeration of a flat panel photobioreactor

Bakalářská práce  
2022

Adam  
BEJŠÁK

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bejšák** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **490926**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Aerace deskového fotobioreaktoru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Aeration of a flat panel photobioreactor**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte literární a průmyslovou rešerši provozních podmínek existujících technologií a konstrukčních variant systémů využívající směsi vzduchu a čistého CO<sub>2</sub>, pro kultivaci mikrořas (biomasa 3. generace). Na základě teorie tvorby bublin určete vhodné parametry aeračního členu. Optimalizujte konstrukci aeračního členu a navrhnete jeho uchycení v komoře deskového fotobioreaktoru. Definujte ideální provozní podmínky pro kultivaci v poloprovozním deskovém fotobioreaktoru.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**

Ing. Mgr. Vojtěch Bělohlav, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem aerace deskového fotobioreaktoru vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Mgr Vojtěchu Bělohlavovi, Ph.D. za ochotu, přístup, trpělivost a věcné poznámky a rady při konzultacích. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

## Anotační list

**Jméno autora:** Adam Bejšák  
**Název práce:** Aerace deskového fotobioreaktoru  
**Anglický název:** Aeration of a flat panel photobioreactor  
**Rozsah práce:**

počet stran: 66

počet obrázků: 28

počet tabulek: 8

počet příloh: 2

**Akademický rok:** 2021/2022

**Jazyk práce:** český

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky – U12118

**Studijní program:** Teoretický základ strojího inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D.

**Klíčová slova:** deskový fotobioreaktor, aerační element, aerace, mikrořasy, kultivační systémy

**Keywords:** flat panel photobioreactor, aerator, aeration, microalgae, cultivation systems

## Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na provzdušňování deskového fotobioreaktoru. Byla zpracována rešerše popisující ideální provozní podmínky pro kultivaci mikrořas a existující konstrukční varianty kultivačních systémů. Na základě dřívějších experimentů a rešerše je navržen, zhotoven a testován aerační člen deskového fotobioreaktoru. Experimenty jsou provedeny v poloprovozním měřítku při zvolených provozních podmínkách, které zahrnují ideální parametry pro kultivaci kmene *Chlorella vulgaris*. Během experimentu byla měřena zádrž vzduchu, velikost a rychlost stoupajících bublin a homogenita provzdušňování. Výsledky experimentů jsou diskutovány a porovnány s teoretickými výsledky vztahů popsanych v rešerši.

## Annotation

This bachelor's thesis is focused on the aeration of a flat panel photobioreactor. The scope of the conducted research is optimal cultivation conditions of microalgae as well as existing cultivation systems. An aerator has been designed, manufactured, and tested based on previous experiments and research. The experiments are conducted on a pilot plant scale using optimal conditions for the cultivation of *Chlorella vulgaris*. The gas holdup, bubble velocity, bubble size, and regime of bubbling were measured, and the results are discussed and compared to the theoretical equations mentioned in the research.

## Obsah

1.	Úvod .....	8
2.	Mikrořasy a jejich využití .....	9
2.1	Využití mikrořas .....	9
2.1.1	Produkty z mikrořas .....	9
2.1.2	Biorafinerie využívající mikrořasy .....	9
3.	Kultivace mikrořas .....	11
3.1	Parametry ovlivňující proces kultivace .....	11
3.1.1	Světlo .....	11
3.1.2	Teplota .....	11
3.1.3	Živiny .....	11
3.1.4	pH .....	11
3.1.5	Míchání a aerace .....	12
3.2	Kultivační systémy .....	12
3.2.1	Otevřené systémy .....	13
3.2.2	Uzavřené systémy .....	15
3.2.3	Hybridní systémy .....	18
3.2.4	Srovnání systémů .....	19
4.	Probublávání kultivačního média .....	20
4.1	Způsoby aerace .....	20
4.2	Tvorba bublin .....	24
4.3	Zadrž plynu .....	29
4.4	Dvoufázové proudění .....	30
4.5	Smykové napětí .....	31
5.	Pneumatické provzdušňování v laboratorním měřítku .....	33
6.	Cíle praktické části práce .....	36
7.	Aerační element poloprovozního fotobioreaktoru .....	38
8.	Experiment .....	41
8.1	Provozní podmínky .....	41
8.2	Sestava experimentu .....	42
8.3	Postup měření .....	43
8.4	Vyhodnocení měření .....	44

8.5	Výsledky měření .....	46
9.	Závěr .....	53
10.	Bibliografie .....	54
11.	Seznam symbolů .....	61
12.	Seznam řeckých symbolů.....	63
13.	Seznam obrázků .....	64
14.	Seznam tabulek.....	65
15.	Seznam příloh .....	66



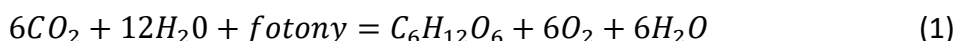
## 1. Úvod

Pěstování mikrořas započalo již v polovině dvacátého století a s postupem času začaly mikrořasy nabývat na významu jako potravinové doplňky a krmiva pro zvířata [1]. S nárůstem emisí skleníkových plynů se mikrořasy znovu dostaly do popředí jako jedna z možností, jak zachytit oxid uhličitý a vrátit jej zpět do biosféry. Díky jejich vysoké rychlosti růstu se tak staly jednou ze surovin využívaných k výrobě obnovitelné energie [2]. Kvůli vysokým nákladům na jejich kultivaci je ovšem využití mikrořas například pro výrobu biopaliv stále neekonomické [3]. S růstem cen energií a důrazem na hledání cesty k dosažení uhlíkové neutrality se však produkce biomasy z mikrořas začíná stávat jedním z velmi slibných řešení. Možností, jak dosáhnout vyšší rentability, je více. Jeden přístup využívá nové poznatky genetického inženýrství k úpravě genomu mikrořas tak, aby produkovaly více lipidů. Další možností je optimalizace kultivačních systémů a provozních podmínek při jejich pěstování za účelem co nejefektivnějšího využití vstupních surovin. Právě tím se zabývá tato bakalářská práce.

Cílem práce je zhotovení aeračního elementu poloprovozního deskového fotobioreaktoru na základě dřívějších experimentů, provedených v laboratorním měřítku. Těmito experimenty bylo ověřeno nové konstrukční řešení aeračního členu, které splňuje definované požadavky pro kultivaci mikrořas. Tyto poznatky je potřeba převést do měřítka, v jakém by mohly být kultivační systémy využity v průmyslu. To s sebou přináší řadu problémů, jako vysoký hydrostatický tlak, zvýšení objemového průtoku aeračního plynu a zajištění dostatečného přísunu živin. Je tedy třeba zpracovat rešerši stávajících aeračních systémů v poloprovozním a průmyslovém měřítku a na základě těchto poznatků optimalizovat konstrukci aeračního členu pro poloprovozní fotobioreaktor. Navržené řešení pak bude ověřeno při zvolených provozních podmínkách odpovídajících danému měřítku.

## 2. Mikrořasy a jejich využití

Mikrořasy jsou mikroskopické, obvykle jednobuněčné organismy, které mohou růst ve vodním, ale i suchozemském prostředí a představují tak velké množství druhů. K jejich růstu je třeba především světlo, voda a zdroj uhlíku [4]. Mikrořasy mohou být heterotrofní nebo autotrofní. Heterotrofní organismy využívají jako zdroj energie organický uhlík a živiny a nepotřebují tak ke svému růstu světlo. Autotrofní organismy jsou schopné pomocí fotosyntézy přeměnit anorganické látky (např.  $CO_2$ ) na organickou hmotu podle následující rovnice [5]:



Mikrořasy jsou schopné velmi rychlé duplikace (až 100x rychleji než suchozemské rostliny). Místo listů, stonků a kořenů využívají k fotosyntéze chlorofyl. Jsou tak schopny pomocí energie ze světla přeměnit  $CO_2$  na glukózu, kterou potřebují pro svůj růst [2]. Mikrořasy vyprodukují až 50 % atmosférického kyslíku [4], vyskytují se ve všech ekosystémech a tvoří základ potravního řetězce [1]. Autotrofní mikrořasy jsou schopné fixovat až padesátkrát více  $CO_2$  než suchozemské rostliny. Na jeden kilogram biomasy připadá asi 1,83 kg spotřebovaného  $CO_2$  [2].

### 2.1 Využití mikrořas

#### 2.1.1 Produkty z mikrořas

Mikrořasy se využívají jako doplňky stravy či jako krmivo pro suchozemská zvířata ale i vodní organismy. Různé druhy mikrořas jsou schopny produkovat látky s využitím od farmacie až po průmysl. Patří mezi ně například přírodní barviva, mastné kyseliny, vitaminy, antibakteriální a antivirová léčiva nebo řada antioxidantů, sterolů či peptidů [4].

#### 2.1.2 Biorafinerie využívající mikrořasy

##### Čištění odpadních vod

Pro čištění odpadních vod se mikrořasy využívají již více než 40 let. S jejich pomocí lze odstranit živiny jako dusík a síru, ale i těžké kovy [6] a látky pocházející z léčiv. Ke kultivaci mikrořas lze použít odpadní vodu z domácností, zemědělství i průmyslu. V minulosti byla úspěšně použita voda z potravinářství, biorafinerií ethanolu či petrochemického, textilního a papírenského průmyslu [7]. Většina takových studií ovšem zatím proběhla v laboratorním měřítku. Pro čištění odpadních vod se používají převážně traťové systémy, ty mají nízké provozní náklady a zároveň umožňují zpracovat velké množství vody na poměrně malé zastavěné ploše [8]. Nejčastěji využívanými mikrořasami jsou *Chlorella vulgaris* a *Scenedesmus obliquus*. Vyprodukovanou biomasu lze využít pro výrobu biopaliv, chemických látek a biometanu [4].

## Využití spalin

Zatímco objemová koncentrace  $CO_2$  v atmosférickém vzduchu je 0,03 – 0,06 %, ve spalinách, které jsou také volně dostupné, je to 6 – 15 % [2]. Studie ukazují, že některé druhy mikrořas dokážou v závislosti na koncentraci zachytit až 50 % z takto dodaného  $CO_2$  [4]. Pokud by tedy byly v blízkosti průmyslových závodů vybudovány kultivační systémy, bylo by možné využít spalin přímo na místě [2] a snížit tak emise  $CO_2$  [5]. Například *Chlorella KR-1* dokáže vázat uhlík ze spalin bez nutnosti jakýchkoli úprav. Spaliny z různých zařízení ovšem obsahují další toxické látky jako  $NO_x$ ,  $SO_2$  a těžké kovy v množstvích, která mohou růst mikrořas zpomalit či úplně zastavit. Spaliny je tak potřeba před použitím upravit, čímž ale vznikají další náklady [2].

## Výroba biopaliv

Biopaliva vyrobená z mikrořas označujeme jako biopaliva třetí generace. Samotná přeměna usušené biomasy z mikrořas je však technologicky složitý a nákladný proces. Nejprve je třeba biomasu rozdělit na bílkoviny, lipidy, sacharidy a zbylou hmotu, tyto produkty se pak dalšími technologiemi přemění na plynná, pevná či kapalná biopaliva. Většinou se jedná o chemické přeměny jako fermentace, anareobní digesce, pyrolýza a tranesterifikace. Výslednými produkty mohou být vodík, metan, ethanol, biodiesel, ale i letecká paliva, aceton či uhlí [9]. V současné době je ovšem stále ekonomicky výhodnější vyrábět biopaliva z rostlinných olejů, tedy biopaliva první generace [10]. Pro konkurenceschopnost biopaliv třetí generace je třeba zvýšit výtěžnost systémů, nebo je spojit s dalšími technologiemi [4].

### 3. Kultivace mikrořas

Pro dosažení co nejvyšší produktivity kultivačního systému je třeba zajistit mikrořasám ideální podmínky k jejich růstu. Pro fotosyntézu je důležitý především dostatek světla, přísun oxidu uhličitého a živin a zároveň odvedení jejich produktů [2].

#### 3.1 Parametry ovlivňující proces kultivace

##### 3.1.1 Světlo

Pro růst a množení kultur (autotrofních) mikrořas je třeba zajistit dostatečné množství světla. Pokud je koncentrace mikrořas příliš velká, může docházet ke vzájemnému stínění a tedy snížení produktivity. Pokud je ale naopak světla příliš, může dojít k poškození buněk. Záleží také na vlnové délce světla, která by měla být pro většinu mikrořas kolem 680 a 700 nm [11]. Pro zvýšení efektivity fotosyntézy je také dobré střídat světlo (fotochemická fáze) a tmu (biochemická fáze) [12].

##### 3.1.2 Teplota

Ideální teplota pro kultivaci mikrořas se podle druhu pohybuje mezi 20 – 30 °C [12]. S klesající teplotou se rychlost fotosyntézy snižuje, naopak vyšší teploty urychlují jejich metabolismus [2]. S rostoucí teplotou ale podle Henryho zákona klesá rozpustnost  $CO_2$  ve vodě, což může být problematické například při využívání spalin [11]. Nízká rozpustnost  $CO_2$  pak vede k fotorespiraci [2], při které je na světle spotřebováván  $O_2$  a vyvíjen  $CO_2$ . Při nízké koncentraci  $CO_2$  a vysoké koncentraci  $O_2$  může tento proces převládat nad fotosyntézou [13].

##### 3.1.3 Živiny

Hlavními živinami pro růst řas jsou uhlík, dusík a fosfor. Uhlík, který mikrořasy zpravidla získávají z atmosférického vzduchu či přidaného  $CO_2$  [2], je využíván pro fotosyntézu [10], zatímco dusík a fosfor jsou důležité pro jejich metabolickou činnost [2] a tvorbu lipidů [12]. Pro zvýšení efektivity fotosyntézy se do média přidávají další anorganické soli, stopové množství kovů a vitamíny [2]. Potřebné prvky jsou často obsaženy ve skleníkových plynech, a i ty je tak možno využít pro zvýšení produkce mikrořas [10]. Další možností je využití odpadních vod ze zemědělství či průmyslu [5].

##### 3.1.4 pH

Optimální pH je pro většinu druhů mezi 8,2 – 8,7 [10], ale rozmezí se pro různé druhy liší. Důležitým faktorem je množství rozpuštěného  $CO_2$ , při kterém vzniká kyselina uhličitá a pH tedy klesá. Hlídat hodnotu pH je důležité hlavně při používání spalin s vyšším obsahem  $NO_x$  a  $SO_2$ . Prostředí se většinou upravuje hydroxidem sodným či uhličitánem vápenatým [2].

### 3.1.5 Míchání a aerace

Cílem míchání je promíchání suspenze a zvýšení přenosu  $CO_2$  do roztoku a dále přímo do mikrořas [11]. Dále také napomáhá odvedení kyslíku, který v systému vznikl při fotosyntéze [2]. Při nedostatečném míchání by mikrořasy na povrchu mohly být nadbytkem záření poškozeny (fotoinhibice), zatímco řasy, které jsou dále od povrchu by měly světla nedostatek. Dle konstrukce systému se používá mechanické či hydraulické míchání (převážně v otevřených systémech), probublávání – aerace (nejčastěji v uzavřených systémech), či jejich kombinace [12]. K aeraci lze využít směs vzduchu s  $CO_2$ , jehož koncentrace bývá pro nejvyšší míru přenosu od 2 do 5 % [11]. Příliš velké množství  $CO_2$  v systému může vést k jeho ztrátám přenosem do atmosféry. V kombinaci s příliš intenzivním mícháním pak může dojít k poškození membrány mikrořas i jich samotných. Aerace, konkrétně cena aeračního plynu a jeho následná distribuce, může u uzavřených systémů představovat velkou část nákladů. Je proto nutné stanovit správnou míru míchání a zásobování systému, a to i z ekonomického hlediska [2].

Mikrořasy mají společně se sinicemi v porovnání s ostatními organismy schopnými fotosyntézy největší účinnost přeměny  $CO_2$  na kyslík a biomasu [14]. Tato schopnost mikrořas závisí na jejich druhu, typu kultivačního systému, parametrech jeho provozu i koncentraci  $CO_2$  v dodávaném plynu. Při určení účinnosti fixace  $CO_2$  se většinou používají plyny s jeho různými koncentracemi [2].

Pro určení fixace  $CO_2$  je možné použít přímé či nepřímé metody. Přímé metody ji určují na základě množství  $CO_2$  v biomase, zatímco nepřímé metody porovnávají koncentraci  $CO_2$  ve vstupujícím a vystupujícím proudu plynu. Ve většině studií je i přes náchylnost k chybovosti použita přímá metoda, daná vztahem:

$$CO_{2fixace} = C \cdot P \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (2)$$

Kde  $C$  [ $kg/kg$ ] je obsah uhlíku v buňkách mikrořas,  $P$  [ $g \cdot l^{-1} \cdot den^{-1}$ ] je denní produkce biomasy,  $M_{CO_2}$  [ $g \cdot mol^{-1}$ ] je molární hmotnost  $CO_2$  a  $M_C$  [ $g \cdot mol^{-1}$ ] je molární hmotnost uhlíku.

Při 50% obsahu uhlíku v buňkách mikrořas byla dle rovnice (2) ve válcovém fotobioreaktoru vypočtena fixace  $1,21 g_{CO_2} \cdot l^{-1} \cdot d^{-1}$ . Byl použit druh *Chlorella sorokiniana* a aerační plyn obsahoval 5 %  $CO_2$ . Jak již ale bylo zmíněno, pro různé druhy mikrořas se liší jak obsah uhlíku v buňkách, tak schopnost jej fixovat [15].

## 3.2 Kultivační systémy

Mikrořasy je možné pěstovat v otevřených systémech či uzavřených fotobioreaktorech [16]. Další možností jsou hybridní systémy, kde jsou fotobioreaktory určeny k vytvoření kultivačního média a další produkce pak probíhá v otevřených

systémech [17]. Volba kultivačního systému závisí především na druhu mikrořas, účelu jejich výroby, klimatu i dostupnosti živin. Například mikrořasy, k jejichž produkci je použita odpadní voda, nelze využít pro výrobu doplňků stravy, ovšem můžeme je využít při výrobě chemikálií a metanu. Porovnání otevřených a uzavřených systémů není snadné, je nutné vzít v potaz různé druhy mikrořas, které jsou v nich pěstovány a metodu, kterou použijeme pro měření produktivity. Nejčastěji se hodnotí produktivita vztážená na objem, plochu či ozářenou plochu [4]

### 3.2.1 Otevřené systémy

Kultivace mikrořas v otevřených systémech je dodnes nejpoužívanější a nejpreferovanější variantou a lze ji provádět jak v krytých, tak otevřených prostorách. Umožňuje produkci mikrořas při poměrně nízkých nákladech na provoz a snadné údržbě. Mezi otevřené systémy patří například přírodní i umělé vodní nádrže či kaskádovité a traťové kultivační systémy [12]. Otevřené systémy mají zpravidla velkou plochu kontaktu média se vzduchem, což může vést ke značným ztrátám vody způsobeným odpařováním a zároveň je systém náchylnější ke kontaminaci. Těmto jevům je možné zabránit zakrytím systému průhledným materiálem [2].

#### Traťový systém

Většina komerčně dostupných mikrořas pochází z traťového systému, a to právě kvůli nízkým pořizovacím a provozním nákladům [18]. Traťové systémy jsou oválné nádrže, ve kterých je médium kontinuálně poháněno rotujícími oběžnými koly s lopatkami (Obr. 1). To zajišťuje cirkulaci a homogenizaci mikrořas [12] a živin, přiváděných na začátku trati, a zároveň napomáhá zachycení  $CO_2$  z atmosféry [6]. Promíchávání také napomáhají přepážky, které usměrňují proud a společně se vznikajícími víry zabraňují usazování, které by vedlo k nedostatečnému osvětlení části mikrořas [12]. K promíchávání média lze také využít probublávání odpadního  $CO_2$ , který může být při udržení ostatních parametrů (např. pH) využít až z 90 % [6]. K probublávání se používají perforované trubky (například ve tvaru písmene Z), které jsou s rozestupy umístěné u dna systému [19]. Nízká výška hladiny ovšem neposkytuje plynu dostatečnou dobu zdržení pro rozpuštění  $CO_2$  a dochází tak ke značným ztrátám do atmosféry. K dosažení vyšší efektivity přenosu je možné ve dně systému vytvořit

prohlubně pro aerátory a zvýšit tak sloupec suspenze nad nimi. Další možností jsou plynové difuzéry podobné těm, které se používají v akvaristice [20].



**Obr. 1** Traťový systém [50]

K odstranění kyslíku, který je v médiu rozpuštěn, dochází difuzí na hladině. Díky míchání oběžnými koly je proces o něco efektivnější, ovšem v době nejvyšší efektivity fotosyntézy stále nedostatečný. Důsledkem je zpomalení růstu mikrořas, což vede ke snížené produktivitě systému [20]. Dalším negativním faktorem je nízký poměr osvětlené plochy a objemu, což vede k malé koncentraci mikrořas a dalšímu snížení efektivity fotosyntézy. Ta je definovaná jako poměr čisté fotosyntetické asimilace  $P_n$  (photosynthetic rate) a fotosynteticky aktivního záření  $PAR$  (photosynthetically active radiation) [18] (u mikrořas 400 až 700 nm [21]) a pro traťové systémy se pohybuje kolem 1 – 1,5 % [18]. Traťové systémy se používají ke kultivaci mikrořas *Chlorella*, *Spirulina* či *Haematococcus* [2].

## Kaskádový kultivační systém

Kaskádový systém se skládá z více nakloněných panelů uspořádaných za sebou, po kterých proudí suspenze mikrořas ve vrstvě menší než 10 mm (Obr. 2) [16]. Z poslední desky je suspenze pomocí čerpadla přepumpována opět na nejvyšší panel přímo, či přes retenční nádrž. Při čerpání také dochází k promíchání média. Pro vyšší účinnost fotosyntézy je v nádrži možné probublávat médium směsí vzduchu a  $CO_2$  například pomocí perforované hadice [22]. Systém je možné poměrně snadno rozšířit o další panely a pro větší efektivitu je možno instalovat umělé osvětlení [2]. Díky malé výšce proudící suspenze je možné dosáhnout poměrně velké koncentrace mikrořas při zachování dostatečného prosvícení celé vrstvy [12]. Zůstává ovšem možnost kontaminace média. Malá vrstva suspenze zároveň oproti traťovým systémům snižuje její objem vzhledem k zastavěné ploše [23]. Nové koncepty kaskádových systémů by v budoucnu mohly nahradit málo efektivní traťové systémy [22].



Obr. 2 Kaskádový systém [22]

### 3.2.2 Uzavřené systémy

Uzavřené systémy zaručují ochranu mikrořas před vnějšími vlivy či kontaminací a zároveň umožňují udržovat a kontrolovat ideální živné prostředí (pH, teplota, kyslík, množství  $CO_2$  atd.) [16]. Světlo se tedy nedostane k médiu přímo, ale skrz průhlednou stěnu fotobioreaktoru [3]. Ochrana před možností kontaminace umožňuje následné použití mikrořas pro farmaceutické účely či pro výrobu doplňků stravy a pod. [2]. Fotobioreaktory mohou být umístěné venku nebo uvnitř, kde je sluneční světlo možné nahradit umělým osvětlením [12]. Systémy jsou navrženy tak, aby nevznikala temná místa, což zaručí efektivnější proces fotosyntézy. Zároveň je také důležité zajistit ideální množství  $CO_2$  pro růst mikrořas [2]. Druhy uzavřených systémů se liší provedením, výtěžností či možností využití a rozšíření [12].



## Trubkový fotobioreaktor

Trubkový fotobioreaktor (Obr. 3) se skládá ze dvou sekcí. Tou první je systém plastových nebo skleněných trubek, uspořádaných vertikálně, horizontálně nebo do šroubovice, ve kterých dochází k ozařování a růstu řas. Druhou částí systému je zásobník [5], v němž dochází k přidávání směsi  $CO_2$  se vzduchem, odebrání vyprodukovaného  $O_2$  a zároveň odebrání části vyprodukovaných mikrořas [2]. Zásobník funguje podobně, jako absorpční kolona. Délka trubek je omezena množstvím kyslíku vyprodukovaného při fotosyntéze, stejně jako množstvím zužitkovaného  $CO_2$  [20]. Vyšší množství kyslíku totiž může zpomalovat proces fotosyntézy a při vyšších teplotách také může docházet k fotooxidaci [5]. I při probublávání přímo v trubkách a dodání spotřebovaného  $CO_2$  by byl růst mikrořas kvůli tomuto procesu zpomalen. Cirkulaci média (rychlostí  $0,3 - 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) mezi ozařovanou částí a zásobníkem zajišťuje čerpadlo. Průměr trubek je  $50 - 200 \text{ mm}$  a je volen tak, aby byla suspenze dostatečně ozářena a zároveň docházelo k turbulentnímu proudění, které zajistí dostatečné promíchání a absorpci [2].



Obr. 3 Vertikální a horizontální trubkový fotobioreaktor [51]

## Deskový fotobioreaktor

Deskový fotobioreaktor (Obr. 4) je tvořen dvěma vertikálně či horizontálně uloženými deskami [5], které mohou být vyrobeny ze skla, polykarbonátu nebo plexiskla. Hlavní výhodou je velký poměr osvětleného povrchu vůči objemu [10]. To zaručuje dobré osvětlení celé vrstvy a umožňuje větší koncentraci mikrořas [18]. Pro dosažení vyšší produktivity je možné deskové fotobioreaktory naklánět tak, aby se změnila intenzita dopadajícího světla a zároveň došlo k využití rozptýleného a odraženého světla. Ze stejného důvodu je panely výhodné seskupit [16]. Ze studií dále vyplývá že v panelech, jejichž desky směřují na sever a jih, je oproti panelům orientovaných západovýchodně produkce biomasy vyšší až o 50 % [18]. K míchání se používá probublávání vzduchem, jeho intenzita ovšem musí být značná, čímž výrazně rostou provozní náklady [16]. K probublávání slouží aerační člen, umístěný ve spodní části fotobioreaktoru a vyprodukovaný kyslík je odváděn shora. Jiné typy systémů využívají vyrovnávací nádrž, do které je čerpána suspenze z horní části fotobioraktoru a kde dochází k odvedení kyslíku. Z nádrže je suspenze odváděna čerpadlem, za kterým

je přiváděn  $CO_2$ , a do systému je přivedena zpět ve spodní části [24]. Probublávání lze také realizovat přímo ve vyrovnávací nádrži, obdobně jako u trubkového či kaskádového systému.

Kapacita deskového fotobioreaktoru je až  $2 m^3$ , s větším objemem ale roste hydrostatický tlak, což zvedá požadavky na konstrukci [2]. Problematické je také udržení optimální teploty pro růst mikrořas a zarůstání stěn, které snižuje účinnost fotobioreaktoru [10]. K míchání suspenze je možné využít probublávání, které zároveň pomáhá i s čištěním stěn [16]. v deskových fotobioreaktorech je porovnání s trubkovými fotosyntéza efektivnější a zároveň jsou méně náchylné k rozpouštění kyslíku [5].



**Obr. 4** Deskový fotobioreaktor

## Válcový fotobioreaktor

Válcové fotobioreaktory jsou levné, umožňují velmi dobrou kontrolu kultivačního prostředí a jejich obsluha je snadná [5]. Často se proto využívají pro kultivaci mikrořas (násady), které lze dále pěstovat například v traťových systémech [16]. Mikrořasy jsou pěstovány ve válcových nádobách, které jsou zespodu probublávány vzduchem s  $CO_2$  (Obr. 5) [12]. Válcové fotobioreaktory pak dle konstrukce rozdělujeme na dva hlavní typy. Jednou možností je rozdělení nádoby přidaným souosým válcem, umístěním nad aerační člen ve tvaru disku. Stoupající bublinky vytváří proud, který ve vnitřním válci směřuje nahoru a podél stěn vnějšího válce klesá dolů. Druhý typ vnitřní válec nevyužívá a bublinky tak stoupají vzhůru v celém průřezu nádoby. Tím je zajištěna aerace, míchání a odvedení  $O_2$  vyprodukovaný během fotosyntézy. Intenzita těchto procesů lze tedy přímo ovlivnit množstvím dodaného plynu a velikostí bublin, která ovlivňuje čas jejich stoupání [5]. Válcový fotobioreaktor je většinou osvětlován zvenku, pro rovnoměrnější a intenzivnější prosvícení suspenze lze ale využít i osvětlení zevnitř [12].



Obr. 5 Válcový fotobioreaktor [12]

### 3.2.3 Hybridní systémy

Hybridní systémy jsou kombinací uzavřených a otevřených systémů. Otevřené systémy mají nízké náklady na provoz, ovšem při kultivaci vzniká riziko kontaminace jinými mikroorganismy. Toto riziko je v uzavřených systémech v podstatě eliminováno, ovšem náklady na jejich provoz jsou vysoké. Cílem hybridních systémů je tedy zvýšit produktivitu otevřených systémů při zachování nízkých nákladů [5]. Jedním příkladem je traťový systém, který je zakrytý tak, aby byly plyny nad médiem odděleny od okolního prostředí. To zabrání vniknutí zvěře, hmyzu, prachu i dešťové vody, což snižuje možnost kontaminace [16]. Další možností je zapojení uzavřeného fotobioreaktoru před traťový systém. V uzavřeném systému lze kontrolovat kontaminaci a zajistit dostatečné množství živin pro kontinuální produkci mikrořas. Suspenze je přečerpána do traťového systému ve chvíli, kdy má dostatečnou hustotu pro zajištění dominantního růstu pěstované kultury [5].

### 3.2.4 Srovnání systémů

V Tab. 1 jsou popsány výhody a nevýhody jednotlivých systémů.

**Tab. 1** Výhody a nevýhody kultivačních systémů [5] [12] [24]

Typ systému	Výhody	Nedostatky
Traťový systém	Nehrozí hromadění kyslíku Nízké pořizovací a provozní náklady Snadná údržba Nízká spotřeba energie	Malá efektivita provzdušňování Nízká produkce biomasy Riziko kontaminace Velká zastavěná plocha Slabé míchání
Kaskádový systém	Snadné rozšiřování Dobré promíchání a osvětlení media Velká koncentrace mikrořas	Nízké využití $CO_2$ Ztráty vody odpařováním Velká zastavěná plocha
Trubkový fotobioreaktor	Možnost regulace teploty Produktivita (i při venkovním použití) Velká osvětlená plocha	Akumulace kyslíku Omezený přenos hmoty Při rozpouštění $CO_2$ může vzniknout kyselé prostředí Větší koncentrace řas snižuje prosvícení vrstvy
Deskový fotobioreaktor	Nízká akumulace kyslíku Efektivní přenos hmoty Prosvícení celé vrstvy Velká osvětlená plocha Velká produktivita Možnost venkovního i vnitřního použití	Obtížná regulace teploty Možnost zanesení stěn Hydrostatické namáhání
Válcový fotobioreaktor	Vysoký přenos hmoty Dobré a šetrné promíchávání Kompaktnost Nízká spotřeba energie Snadné čištění	Malá osvětlená plocha Náklady Omezené rozšíření systému
Hybridní systémy	Nízké náklady Velká produktivita Snižené riziko kontaminace	Je třeba vyškolené pracovníky

Při výběru vhodného kultivačního systému pro konkrétní použití je nutné zvážit mnoho hledisek. Otevřené systémy mají nízké pořizovací a provozní náklady, ale jejich výtěžnost není příliš vysoká. Trubkový fotobioreaktor má velkou výtěžnost, ovšem při čerpání mikrořas může dojít k jejich poškození. Vysoké provozní náklady deskového fotobioreaktoru jsou z podstatné části dány cenou aeračního plynu, ale využitím spalin je lze značně snížit. Zásadní je tak umístění kultivačních systémů, a to i z pohledu podnebí.

## 4. Probublávání kultivačního média

Intenzita probublávání je pro růst mikrořas klíčovým parametrem. Slouží ke zvýšení přenosu hmoty, zajištění požadované koncentrace  $CO_2$ , regulaci množství rozpuštěného kyslíku a zároveň pomáhá homogenizovat médium. Dále také zabraňuje usazování a shlukování buněk a zanášení fotobioreaktoru.

Množství dodaného plynu lze dle rovnice (3) vyjádřit jako objemový průtok plynu vztažený na jednotku objemu kultivačního média (gas volumetric flow rate per unit volumetric culture medium – vvm)  $Q [min^{-1}]$ .

$$Q = \frac{\dot{V}_g}{V} \quad (3)$$

kde  $\dot{V}_g [m^3 \cdot min^{-1}]$  je objemový průtok plynu a  $V [m^3]$  je objem vsádky [25].

S rostoucím množstvím dodaného plynu roste turbulence a s ní se zvyšuje i přenos hmoty mezi aeračním plynem a suspenzí [26]. Nadměrná aerace ovšem může vést k poškození mikrořas vlivem třecích sil a způsobuje značné zvýšení provozních nákladů [27]. U deskového fotobioreaktoru může aerace představovat až 40 % celkových nákladů pro produkci biomasy [28]. Je tedy potřeba zajistit, aby bylo probublávání efektivní jak z hlediska nákladů, tak i vzhledem k produktivitě systému. Je jej například třeba sladit s cyklem světla, kdy dochází k fotosyntéze a tedy spotřebě  $CO_2$  [27]. Dalším faktorem je tvorba a velikost bublin, jež souvisí s disperzí plynu do média a dobou, jakou plyn v médiu stráví [25].

### 4.1 Způsoby aerace

#### Pneumatická aerace

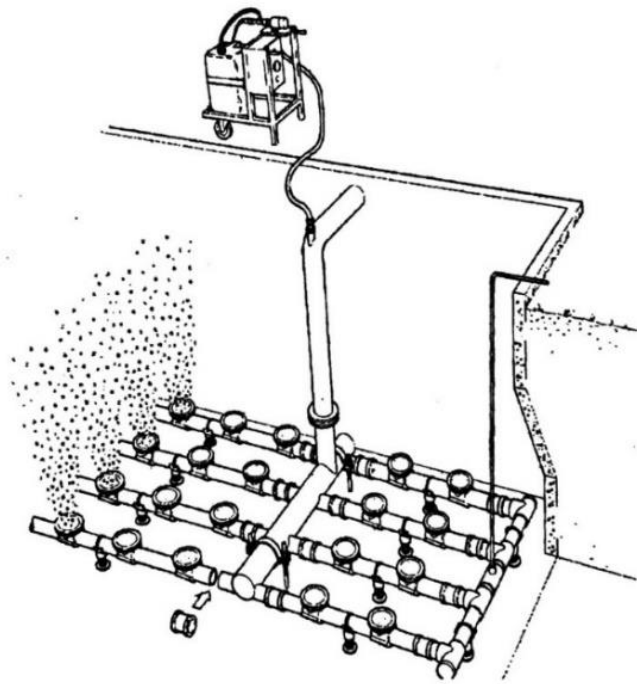
Při pneumatické aeraci je plyn do média dodáván kompresory, turbodmychadly nebo ventilátory. Plyn je následně rozptýlen aeračními elementy – difuzéry, jako jsou například děrované trubky (Obr. 6), porézní materiály z keramiky či plastů nebo perforované flexibilní membrány [29]. Aerační elementy mají tvar desek, trubek, hadic, dómů nebo disků [30]. Dle průměrů otvorů a pórovitosti pak vznikají bubliny různé velikosti, podle té dělíme pneumatickou aeraci na tři druhy [29] (Tab. 2).

*Tab. 2 Rozdělení typů pneumatické aerace [31]*

Typ aerace	Průměr bubliny (mm)	Typický distributor
Jemnobublinná	1 – 5	Porézní hadice/membrána
Středobublinná	5 – 10	Děrovaná trubka
Hrubobublinná	> 10	Otevřené hadice/trubky



Účinnost přestupu mezi plynem a kapalinou je závislá na druhu aeračního elementu, hloubce jeho ponoření, zatížení elementu plynem a na intenzitě aerace. Systém je složen ze zdroje plynu, jednotky filtrace plynu, rozvodného potrubí a aeračního elementu. Nejrozšířenějším typem pneumatické aerace je jemnobublinná aerace [29], převážně kvůli vysoké energetické účinnosti a snadné regulaci aeračního plynu. S rostoucí intenzitou aerace se ovšem využití plynu zmenšuje, jelikož dochází ke spojování mikrobublin. Záleží to převážně na zatížení plochy aeračního elementu přiváděným vzduchem. U středobublinné a hrubobublinné aerace naopak dochází k rozbití větších bublin [30].

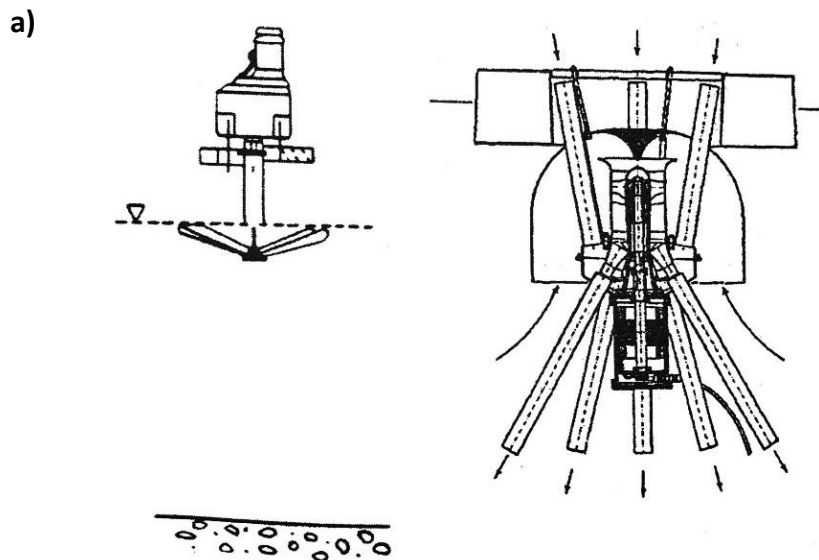


*Obr. 6 Pneumatická aerace [29]*

### Mechanická aerace

Mechanické provzdušňování je zajišťováno povrchovými aerátory, které dělíme dle směru osy na vertikální a horizontální a dále na povrchové a ponořené (Obr. 7) [29]. Povrchové aerátory se otáčejí v médiu a vytvářejí turbulenci celého objemu vsádky a disperzi vodních částic ve svém okolí, čímž zajistí přestup  $CO_2$  ze vzduchu do média [30]. Ponořené, například diskové aerátory vodu nerozstříkují, ale přečerpávají a odděleně ji zavzdušňují.

Mechanické aerátory mají jednoduché provedení a instalaci, jsou spolehlivé a mají dobré míchací účinky. Nevýhodou je omezená regulace a tvorba aerosolu [29]. Jejich provoz je energeticky náročný a tvoří tak podstatnou část provozních nákladů fotobioreaktoru [32]. Při intenzivnějším míchání také může docházet k poškození membrán mikrořas a jejich znehodnocení.



b)

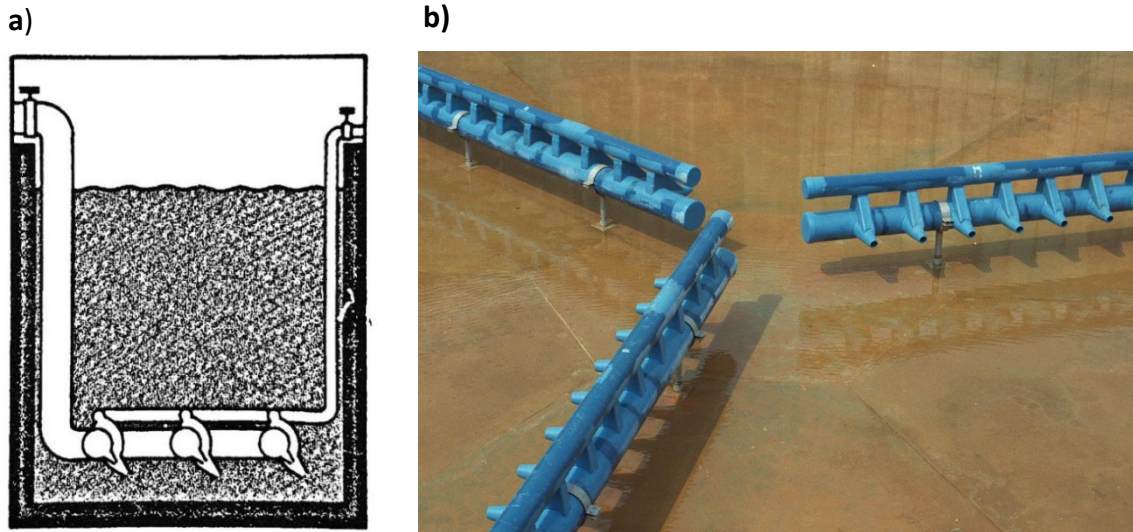


**Obr. 7** Mechanické aerátory, a) schéma konstrukčních variant mechanického aerátoru [31], b) využití mechanického aerátoru v technologii čištění odpadních vod [33]

### Hydropneumatická aerace

Při hydropneumatickém provzdušňování je vzduch nasáván ejektorem, který je umístěn na výtlačném potrubí čerpadla [30]. Dodávaná voda proudí přes trysku, za níž se vytváří podtlak, který zajistí dodání vzduchu. Vzduch je pak smíšen s proudem vody

a u dna nádrže je vehnán do média, jak je znázorněno na Obr. 8. Principiálně se tedy jedná o pneumatickou aeraci. Systém je relativně jednoduchý a má nízké nároky na obsluhu a údržbu. Nevýhodou je ovšem nízká účinnost a směrová orientace proudu vzduchu a vody [29].



**Obr. 8** *Hydropneumatické aerátory, a) schéma konstrukčních variant hydropneumatického aerátoru [29], b) využití hydropneumatického aerátoru v technologii čištění odpadních vod [33]*

### Pervaporace

Vzhledem k energetické náročnosti probublávání média byly testovány nové způsoby dodání  $CO_2$  do média. Příkladem je deskový fotobioreaktor na Obr. 9, jehož jedna stěna je celá nahrazena membránou, nebo fotobioreaktor, ve kterém je ponořen pytel z plynopropustné membrány [34].



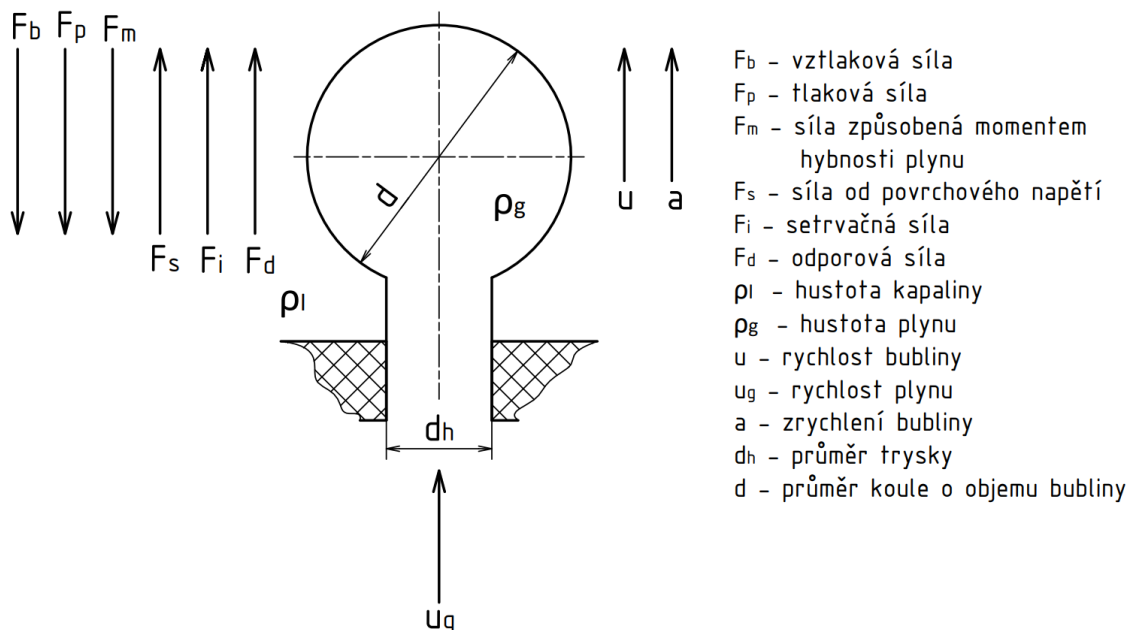
**Obr. 9** *Plynopropustný fotobioreaktor [28]*



Membrána je vyrobena ze silikonové pryže nebo hydrofobní mikroporézní fólie, která je propustná pro plyn, ale nikoli pro vodu. Membrána vytvoří mezi fázemi velkou plochu, která umožňuje výměnu plynu bez požadavku na další energetické vstupy. Oxid uhličitý je do kapaliny přiváděn difuzí a kyslík je odváděn procesem pervaporace [28]. Jedná se o rozpustně-difuzní přenos hnaný gradientem tlaku nebo koncentrace napříč membránou, při kterém dochází k dělení kapalné a plynné směsi. Složky směsi nejdříve difuzí projdou roztokem k povrchu membrány, kde jsou adsorbovány a difundují skrz ni. Na druhém povrchu membrány dochází k desorpci do okolního plynu. Pervaporace se nejčastěji využívá při dehydrataci organických látek [35]. Tento způsob dodávání  $CO_2$  umožňuje jeho efektivnější využití, ovšem vyžaduje novou konstrukci fotobioreaktoru a jeho další testování [34].

## 4.2 Tvorba bublin

Velikost bubliny je důležitým parametrem pro návrh aeračního členu. Má zásadní vliv na disperzi, a tedy i na přenos hmoty. Rovnice, které se zabývají určením velikosti bublin, jsou komplikované a vyžadují iterace, nebo mají omezený rozsah platnosti. Byla proto navržena jednodušší rovnice ověřena experimentálním měřením. Rovnice uvažuje zjednodušenou geometrii vyobrazenou na Obr. 10, zde sférickou bublinu přichycenou válcovým hrdlem k trysce a konstantní objemový průtok [36].



Obr. 10 Model bubliny přichycené k trysce [36]

V počáteční fázi, kterou nazýváme expanze, zůstává bublina přichycena ke trysce až do doby, kdy výslednice vztlkových sil přesáhne výslednici sil odporových. Díky rovnováze vyjádřené rovnicí (4) je možné určit objem bubliny na konci expanze [36].

$$F_b + F_m + F_p = F_s + F_d + F_i \quad (4)$$

kde  $F_b$  [N] je vztaková síla,  $F_m$  [N] je síla způsobená momentem hybnosti plynu,  $F_p$  [N] tlaková síla,  $F_s$  [N] je síla od povrchového napětí,  $F_d$  [N] je odporová síla a  $F_i$  [N] setrvačná síla.

Po počáteční fázi následuje fáze odpojení, kdy dochází k porušení rovnováhy a bublina se začne zvedat. K trysce je stále připojena hrdlem, které se postupně zužuje až dojde k úplnému oddělení bubliny. Určení objemu bubliny na konci této fáze je významně komplikovanější. Řešením tohoto problému se zabývá více modelů, rozsah jejich platnosti je ovšem omezený. Po zavedení úprav je však možné využít pohybovou rovnici (4) [36].

Vztakovou sílu  $F_b$  určíme ze vztahu:

$$F_b = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g \quad (5)$$

kde  $d$  [m] je průměr koule, jež má stejný objem jako bublina,  $\rho_l$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] je hustota kapalně fáze,  $\rho_g$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] je hustota plynné fáze a  $g$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] je gravitační zrychlení.

Jelikož rovnice (5) nezohledňuje, že tlak plynu  $p_g$  [Pa] je v rovině trysky vyšší než tlak vody  $p_l$  [Pa], je možné zavést tlakovou sílu:

$$F_p = \frac{\pi}{4} \cdot d_h^2 \cdot (p_g - p_l) \quad (6)$$

kde  $d_h$  [m] je průměr trysky.

Tlaková síla na průměru hrdla bubliny závisí se druhou mocninou, zatímco síla od povrchového napětí  $F_s$  [N] (rovnice 8) s tímto parametrem roste lineárně. Tlaková síla je ovšem v tomto experimentálně ověřeném postupu ignorována. Zanedbání této síly začne způsobovat značnou chybu ve výpočtu až při překročení kritického průměru trysky, který je pro systém vzduch – voda roven 6,6 mm.

Při vysokém tlaku a velkém objemovém toku lze určit i sílu způsobenou momentem hybnosti plynu:

$$F_m = \frac{\pi}{4} \cdot d_h^2 \cdot \rho_g \cdot u_g^2 \quad (7)$$

kde  $u_g$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je rychlost plynu v trysce.

Síla od momentu hybnosti plynu je až na provoz při vysokém tlaku a průtoku plynu zanedbatelná a ve zkoumaných provozních podmínkách ji uvažovat nemusíme [36].

Sílu od povrchového napětí určíme z rovnice:

$$F_s = \pi \cdot d_h \cdot \sigma \quad (8)$$

kde  $\sigma [N \cdot m^{-1}]$  je povrchové napětí.

Pro odporovou sílu platí vzorec [36]:

$$F_d = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot c_d \cdot \frac{\rho_l \cdot u^2}{2} \quad (9)$$

kde  $c_d [-]$  je bezrozměrný součinitel odporu, který lze pro malá Reynoldsova čísla  $Re \in (0; 0,2)$  podle Stokese určit ze vztahu [37]:

$$c_d = \frac{24}{Re} \quad (10)$$

a Reynoldsovo číslo lze určit z rovnice:

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho_l}{\mu_l} \quad (11)$$

kde  $\mu_l [Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita kapaliny a  $u [m \cdot s^{-1}]$  je rychlost bubliny.

Rychlost bubliny  $u [m \cdot s^{-1}]$ , použitou v rovnicích (9) a (11), lze určit z rovnice:

$$u = \frac{9 \cdot \dot{V}_g}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (12)$$

kde  $\dot{V}_g [m^3 \cdot s^{-1}]$  je objemový průtok plynu tryskou a  $d [m]$  je průměr koule o objemu bubliny.

Tato rovnice vychází z empirického výzkumu [36].

Objem bubliny během fáze odpojení neustále roste. Tím se zvětšuje i vztlačová síla, což vede k odtržení bubliny. Setrvačnou sílu bubliny určíme ze vztahu:

$$F_i = (\rho_g \cdot V_g + \rho_l \cdot V_l) \cdot a \quad (13)$$

kde  $V_g [m^3]$  je objem bubliny na konci fáze odpojení,  $\rho_l [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota kapalné fáze a  $\rho_g [kg \cdot m^{-3}]$  je hustota plynné fáze [36].

Zrychlení bubliny  $a [m \cdot s^{-2}]$  a objem kapaliny, která je unášena stoupající bublinou  $V_l [m^3]$  jsou určeny jako:

$$V_l = \frac{11}{16} \cdot V_g \quad (14)$$

$$a = \frac{u}{t_b} \quad (15)$$

Čas utvoření bubliny  $t_b [s]$  získáme z rovnice:

$$t_b = \frac{V_g}{\dot{V}_g} = \frac{\pi \cdot d^3}{6 \cdot \dot{V}_g} \quad (16)$$

kde  $\dot{V}_g [m^3 \cdot s^{-1}]$  je objemový průtok plynu tryskou.

Z rovnice (4) lze po dosazení substitucí vyjádřit vztah pro výpočet průměru sférické bubliny:

$$d^3 = S + \frac{L}{d} + \frac{T}{d^2} \quad (17)$$

kde parametr  $S$  znázorňuje sílu od povrchového napětí  $F_s$ , parametr  $L$  vyjadřuje viskózní tření a parametr  $T$  kombinuje vliv zrychlení bubliny a tvarového odporu a je tak výslednicí setrvačných sil. Rovnici (17) lze řešit iterační metodou [36].

Pro nízké až střední tlaky, kdy hustota plynné fáze  $\rho_l \gg \rho_g$  lze členy rovnice (17) aproximovat vztahy:

$$S = \frac{6 \cdot d_h \cdot \sigma}{\rho_l \cdot g} \quad (18)$$

$$L = \frac{81 \cdot \nu_l \cdot \dot{V}_g}{\pi \cdot g} \quad (19)$$

$$T = \frac{135 \cdot \dot{V}_g^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (20)$$

kde  $\nu_l [m^2 \cdot s^{-1}]$  je kinematická viskozita kapaliny,  $d_h [m]$  je průměr trysky a  $g [m \cdot s^{-2}]$  je gravitační zrychlení.

Pro ověření rovnice (17) byla provedena měření s širokým rozsahem rychlostí proudění a různými průměry trysek [36]. Rozdíl mezi teorií a experimenty se pohyboval v rozmezí  $\pm 10\%$ . Rovnici (17) je možné dále upravovat dle různých módů proudění plynu a viskozit kapaliny. Při snížení objemového průtoku plynu jsou zanedbatelné členy  $L$  a  $T$ , při vysoké viskozitě kapaliny a středním rozsahu objemového průtoku plynu lze zanedbat  $S$  a  $T$  a pro nízkou viskozitu kapaliny a vysoký objemový průtok plynu je

podstatný pouze člen T. S ohledem na to lze rovnici (17) principem superpozice aproximovat tak, aby byla platná pro celý rozsah zkoumaných viskozit  $\mu \in (10^{-3}; 1) Pa \cdot s$  a všechny rychlosti proudění plynu v homogenním a přechodovém režimu bublání:

$$d = \left( S^{\frac{4}{3}} + L + T^{\frac{4}{5}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (21)$$

Po dosazení vztahů (18), (19) a (20) dostaneme rovnici:

$$d = \left( \left( \frac{6 \cdot d_h \cdot \sigma}{\rho_l \cdot g} \right)^{\frac{4}{3}} + \frac{81 \cdot \nu_l \cdot \dot{V}_g}{\pi \cdot g} + \left( \frac{135 \cdot \dot{V}_g^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot g} \right)^{\frac{4}{5}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

Autorem výše uvedených rovnic bylo ověřeno, že přibližné výsledky rovnice (22) se od přesných výsledků rovnice (17) liší nejvíce o 2 % a to při všech relevantních podmínkách. Lze to ukázat například pro systém voda – vzduch, tedy pro kapalinu s nízkou viskozitou. v Tab. 3 jsou dále uvedeny výsledky rovnice (22) při zanedbání členů  $S$  a  $L$ , tedy právě pro případ kapaliny s nízkou viskozitou a pro vyšší objemový průtok plynu. Je patrné, že s rostoucím objemovým průtokem se výsledky přibližného řešení i po zanedbání zmíněných členů blíží přesnému řešení [36]. Pro tyto podmínky tedy můžeme rovnici (22) zjednodušit:

$$d = \left( \frac{135 \cdot \dot{V}_g^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot g} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (23)$$

**Tab. 3** Porovnání přibližného a přesného řešení výpočtu průměru bubliny pro systém voda – vzduch [36]

$\dot{V}_g$ [ $10^{-6} m^3 \cdot s^{-1}$ ]	$d$ [mm]		
	Přesné řešení, rovnice (17)	Přibližné řešení, rovnice (22)	Řešení rovnice (23)
0,00	4,41	4,41	0,00
10,00	8,35	8,27	8,10
20,00	10,80	10,75	10,69
30,00	12,61	12,59	12,57
34,22	13,26	13,26	13,25

Výsledky uvedené v Tab. 3 byly spočteny při atmosférickém tlaku, pro průměr trysky  $d_h = 2 mm$ , kapalina měla hustotu  $\rho_l = 1000 kg \cdot m^{-3}$  a viskozitu  $\mu_l = 0,001 Pa \cdot s$  s povrchovým napětím  $\sigma = 0,07 N \cdot m^{-1}$  [36].

Vlastnosti různých kombinací kapalin a plynů se mohou velmi lišit, stejně jako typ trysky a provozní podmínky. Jak již bylo zmíněno, pro určení průměru bublin vzniklo mnoho modelů a korelací, vždy pro blíže specifikované parametry systému a předpoklady provozu. Příkladem jsou dříve uvedené předpoklady pro platnost rovnice (22), tedy sférický model bubliny, dvě fáze vzniku bubliny a rovnováha sil na konci první fáze. Není ovšem zohledněno množství a rozestupy trysek nebo pórů, ani interakce bublin. Tvorbou bublin, které na sebe vzájemně při svém vzniku mají vliv uvažuje rovnice (24), navržená a experimentálně ověřená pro probublávání skrze perforovanou desku [38].

$$d = 2,9 \cdot \left( \frac{\sigma \cdot d_h}{\rho_l \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

Tato rovnice je velmi podobná Tateovu zákonu (25) [38], který vychází z rovnováhy vztahových sil a sil od povrchového napětí [39].

$$d = 1,8 \cdot \left( \frac{\sigma \cdot d_h}{\rho_l \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

kde  $\sigma$  [ $N \cdot m^{-1}$ ] je povrchové napětí,  $d_h$  [m] je průměr trysky,  $\rho_l$  [ $kg \cdot m^{-3}$ ] je hustota kapalná fáze a  $g$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] je gravitační zrychlení.

Za provozu při parametrech probublávání použitých v Tab. 3 z rovnice (24) vychází průměr bubliny  $d = 7,03 \text{ mm}$  a dle vztahu (25)  $d = 4,37 \text{ mm}$ . Je patrné, že tyto vztahy nezohledňují průtok plynu. Při použití membrán vyrobených z pružných materiálů, jako například guma EPDM, se ovšem při zvyšování průtoku průměr pórů zvětšuje a výsledky zmíněných vztahů tak nezůstávají konstantní.

### 4.3 Zádrž plynu

Pro určení výkonu aeračního členu fotobioreaktoru je důležitým ukazatelem zádrž plynu [40], jelikož přímo ovlivňuje přenos hmoty mezi aeračním plynem a suspenzí mikrořas [41]. K jejímu výpočtu je možné využít rovnice, které se touto problematikou zabývají v chemických reaktorech [42]. Zádrž plynu  $\varepsilon_g$  [–] je měřena srovnáním výšky kapaliny před provzdušněním  $H_0$  [m] a po provzdušnění  $H$  [m] [14] a v podstatě udává podíl plynné fáze v objemu vsádky:

$$\varepsilon_g = \frac{H - H_0}{H} \quad (26)$$

Zadrž plynu závisí kromě provozních parametrů systému například i na průměru komory. Pro její určení tak existuje více korelací [43], jako například experimentálně ověřený vztah platný pro homogenní režim proudění [44]:

$$\varepsilon_g = 3,66 \cdot u_{gr}^{0,83} \quad (27)$$

kde  $u_{gr} [m \cdot s^{-1}]$  je mimovrstvová rychlost plynu daná rovnicí:

$$u_{gr} = \frac{\dot{V}_g}{A} \quad (28)$$

kde  $A [m^2]$  je průtočná plocha testovacího reaktoru a  $\dot{V}_g [m^3 \cdot s^{-1}]$  je objemový průtok plynu [14].

Pro výpočet rychlosti stoupání bublin  $u_b [m \cdot s^{-1}]$  lze také použít vztah:

$$u_b = \frac{u_{gr}}{\varepsilon_g} \quad (29)$$

Další korelace pro výpočet zadržky plynu pro homogenní režim proudění jsou dány vztahy (30) [45] a (31) [46]:

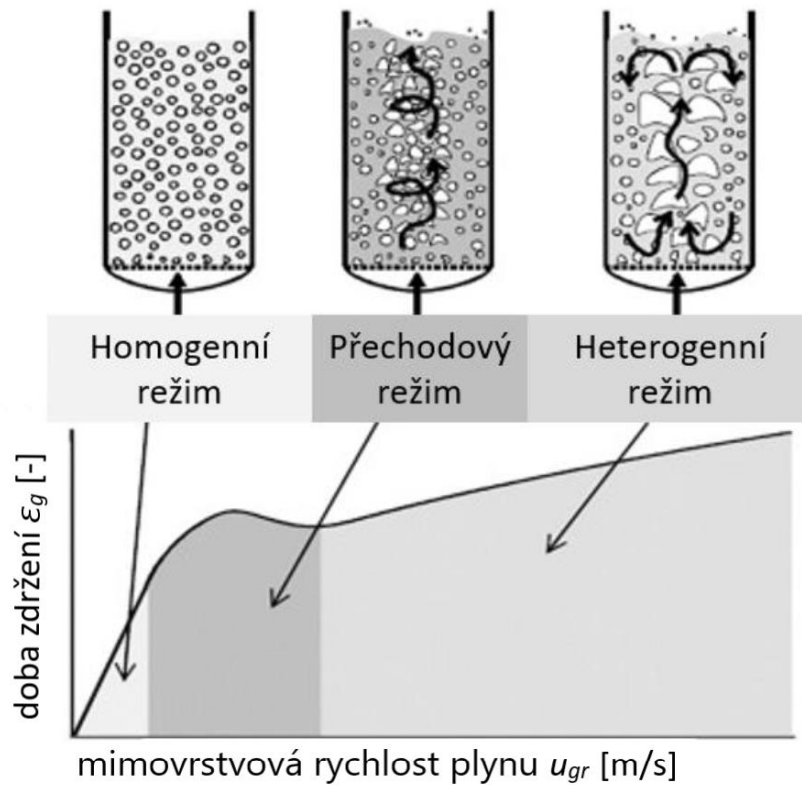
$$\varepsilon_g = 0,765 \cdot u_{gr}^{0,603} \quad (30)$$

$$\varepsilon_g = 0,34 \cdot u_{gr}^{0,705} \quad (31)$$

#### 4.4 Dvofázové proudění

Při přivedení aeračního plynu do reaktoru se začne zvedat výška hladiny kapaliny. S rostoucí rychlostí dodávaného plynu  $u_g$  lze pozorovat téměř lineární závislost výšky hladiny na stoupající mimovrstvové rychlosti, a to až do dosažení přechodové mimovrstvové rychlosti. Tento režim proudění nazýváme homogenní [47]. Homogenní režim proudění je charakteristický rovnoměrným zdržením plynu v celém objemu kapaliny [48], přičemž většina bublin má obvykle průměr v rozsahu 1 – 7 mm [47]. Bubliny stoupají prakticky přímo vzhůru (pro  $d_b < 1 - 2 \text{ mm}$ ), případně s mírnými příčnými a osovými fluktuacemi a v kapalině tak nedochází k rozsáhlejší cirkulaci [48].

Po dosažení přechodové mimovrstvové rychlosti začnou bubliny splývat, vzniká první rychle stoupající velká bublina [47] a začíná docházet k cirkulaci. Z Obr. 11 je patrné, že v přechodovém režimu nabývá závislost zadržky plynu na mimovrstvové rychlosti maxima [48]. Proudění s vyšší, než přechodovou mimovrstvovou rychlostí nazýváme heterogenní nebo turbulentní. Malé bubliny se spojují do větších bublin o průměru 20 – 70 mm, které stoupají rychlostí 1 – 2  $m \cdot s^{-1}$ . Následkem je rozvíření kapalně fáze [47].



**Obr. 11** Závislost zádrže plynu na mimovrstvové rychlosti [49]

#### 4.5 Smykové napětí

Při míchání, aeraci či čerpání mikrořas vzniká smykové napětí, které může vést ke zpomalení jejich růstu, zvýšení úmrtnosti či rozkladu. Citlivost mikrořas na smykové napětí je dána především pevností buněčné stěny a jejich strukturou. Je proto třeba navrhovat parametry míchání a provzdušňování tak, aby byl růst buněk optimální, ale aby nedocházelo k jejich poškození. Z Tab. 4 je patrné, že se důsledky smykového napětí pro různé druhy mikrořas liší, a i to je tedy třeba zvážit při výběru vhodného fotobioreaktoru pro jejich kultivaci.

Smykové napětí  $\tau$  [Pa] působící na mikrořasy lze určit z rovnice:

$$\tau = \gamma \cdot \mu_l \quad (32)$$

kde  $\mu_l$  [Pa · s] je dynamická viskozita kapaliny a  $\gamma$  [s<sup>-1</sup>] je smyková rychlost, daná vztahem [25]:

$$\gamma = \frac{2 \cdot u}{d_b} \quad (33)$$

kde  $u$  [m · s<sup>-1</sup>] je rychlost stoupání bublin a  $d_b$  [m] je průměr bubliny.

Při překročení kritického smykového napětí jsou buňky mikrořas poškozeny, mají sníženou životaschopnost a prodlužuje se doba potřebná k jejich obnově. Zároveň se



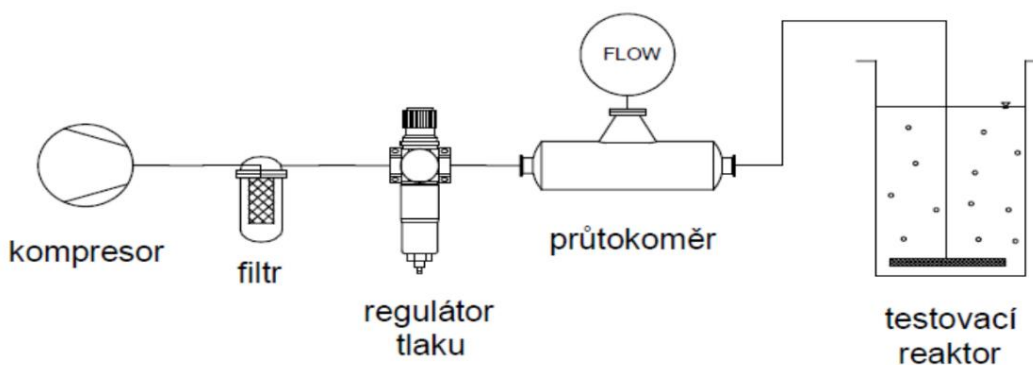
snižuje fotosyntetická aktivita a rychlost růstu. Kritické smykové napětí a jeho vliv na různé druhy mikrořas se liší i dle způsobu, jakým působí, tedy od jeho zdroje. Například u mikrořasy *Haptophyta isochrysis galbana* nebyl vliv smykového napětí při experimentu ve válcovém viskozimetru patrný až do 1,2 Pa. Při napětí 5,4 Pa následoval u těchto mikrořas prudký pokles životaschopnosti, ta následně zůstávala až do napětí 25 Pa stejná. Tato mikrořasa ovšem při experimentu v trubkovém fotobioreaktoru s odstředivým čerpadlem, které způsobovalo tečné napětí 1,3 Pa, nebyla schopna růstu. Výsledky těchto experimentů naznačují, že na odolnost buněk mikrořas má vliv i to, zda jsou v klidu, nebo v procesu dělení. Z obdobných experimentů (Tab. 4) plyne, že smykovému napětí nejlépe odolávají zelené řasy, přičemž jeho kritická hodnota se liší v závislosti na fázi vývoje buněk [25].

**Tab. 4** Kritické hodnoty zvolených parametrů pro růst zelených řas [25]

<b>Kmen</b>	$\tau_{crit}$ [Pa]	<b>Kritický průtok plynu (vvm)</b>	<b>Růst</b>
S. obliquus	0,9	1,34	Zvýšený růst při vyšším průtoku kapaliny
C. vulgaris	0,9	0,16	Optimální růst při 0,16 vvm, úmrtí buněk při 0,19 vvm
C. reinhardtii	0,2	0,28	Malé nebo lineární zvýšení růstu s intenzivnějším promícháváním
D. tertiolecta	/	0,25	Průtok plynu nemá značný vliv na růst
T. suecica	5,2	/	Minimální vliv na životaschopnost až do 88 Pa pro řasy mimo fázi růstu

## 5. Pneumatické provzdušňování v laboratorním měřítku

Diplomová práce Ing. Klimoviče [31] se zabývala testováním porézních membrán aeračních elementů pro deskový fotobioreaktor. Experimenty byly provedeny v laboratorním měřítku v testovacím reaktoru s objemem 20 l (Obr. 12). Byly navrženy dvě konstrukční varianty aeračního členu, na kterých byly testovány celkem čtyři membrány. Konkrétně membrány JetFlex (EPDM), E-Flex (EPDM), E-Flex (silicone) a PUM68 (polyuretane).



**Obr. 12** Schéma zapojení deskového fotobioreaktoru v laboratorním měřítku [31]

Při experimentu byla při objemovém průtoku od 1 do  $5,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  odměřena rychlost a velikost proudících bublin a výška hladiny před a během probublávání. Dalším pozorovaným parametrem byla homogenita režimu proudění plynu při průtoku  $3,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , což je limitní hodnota průtoku pro kmen *Chlorella vulgaris*. Způsob tohoto měření je zaznamenán na Obr. 13.

Na základě naměřených dat byla stanovena zadrž plynu  $\varepsilon_g$  [-], průměrná rychlost bubliny  $u_b$  [ $m \cdot s^{-1}$ ], průměr bubliny  $d_b$  [m], smykové napětí  $\tau$  [Pa] a smyková rychlost  $\gamma$  [ $s^{-1}$ ].



Obr. 13 Porovnání testovaných membrán [31]

Naměřené a spočtené hodnoty byly porovnány s výsledky teoretických výpočtů a zaneseny do grafů. Následně byly vyvozeny následující závěry:

- Doporučená hodnota průtoku je dle literatury  $0,16 \text{ vvm}$ , což je po přepočtu na objem fotobioreaktoru  $3,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .
- Velikost bublin:
  - Velikost bublin se pro jednotlivé membrány nejvíce liší při nízkých hodnotách objemového průtoku plynu, při vyšším průtoku je rozptýl hodnot menší a velikost bublin s ním roste téměř lineárně.
  - Při průtoku  $3,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  je velikost bublin u všech membrán téměř shodně  $2,38 \text{ mm}$ .
- Rychlost bublin:
  - V rozsahu objemového průtoku plynu  $2,5 \text{ až } 4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  je trend růstu rychlosti bublin takřka lineární.
  - Při optimálním průtoku  $3,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  se rychlost stoupání bublin pohybují kolem hodnoty  $0,031 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

- Zadrž plynu:
  - Lze pozorovat lineární závislost zadržky plynu na mimovrstvové rychlosti plynu  $u_{gr} [m \cdot s^{-1}]$  u všech testovaných membrán, nejvyšší výchyly z trendu vykazuje membrána PUM68. Tento poznatek implikuje, že nebyl překročen limit homogenního probublávání.
  - Experimentální data ve zkoumaném rozsahu přibližně odpovídají zvoleným teoretickým korelacím.
- Homogennost probublávání:
  - Při objemovém průtoku  $3,2 l \cdot min^{-1}$  dle Obr. 13 splňují podmínku homogenity nejlépe membrány JetFlex (EPDM) a E-Flex (EPDM). Tyto membrány zajišťují homogenní proudění v téměř celém objemu fotobioreaktoru.
  - Membrána PUM68 je v kombinaci se zvolenou konstrukcí aeračního členu nevhodná pro zajištění homogenního probublávání fotobioreaktoru.
- Průměr pórů:
  - Průměr póru  $d_h [m]$  vzhledem k poddajnosti materiálu membrán závislý na objemovém průtoku plynu a lze jej určit dopočtem z rovnice (22).
- Smykové napětí
  - Nejvyšší napětí dosažené při experimentu bylo  $0,0295 Pa$ , což je méně, než kritické napětí pro všechny kmeny mikrořas v Tab. 4 a k poškození vsádky by tedy nedošlo.

Na základě závěrů se pro konstrukci aeračního elementu zdají být nejvhodnější membrány JetFlex (EPDM) a E-Flex (EPDM), jedná se ovšem o stejnou membránu, kterou výrobce poskytuje dvěma dodavatelům. Membránu je třeba otestovat v poloprovozním měřítku a ověřit, zda dokáže zajistit požadované homogenní proudění, optimální velikost a rychlost bublin a dobu zadržky plynu i při větší výšce a objemu fotobioreaktoru. S tím je spojeno i zvýšení objemového průtoku plynu tak, aby byly zachovány optimální hodnoty průtoku  $0,16 vvm$ .

## 6. Cíle praktické části práce

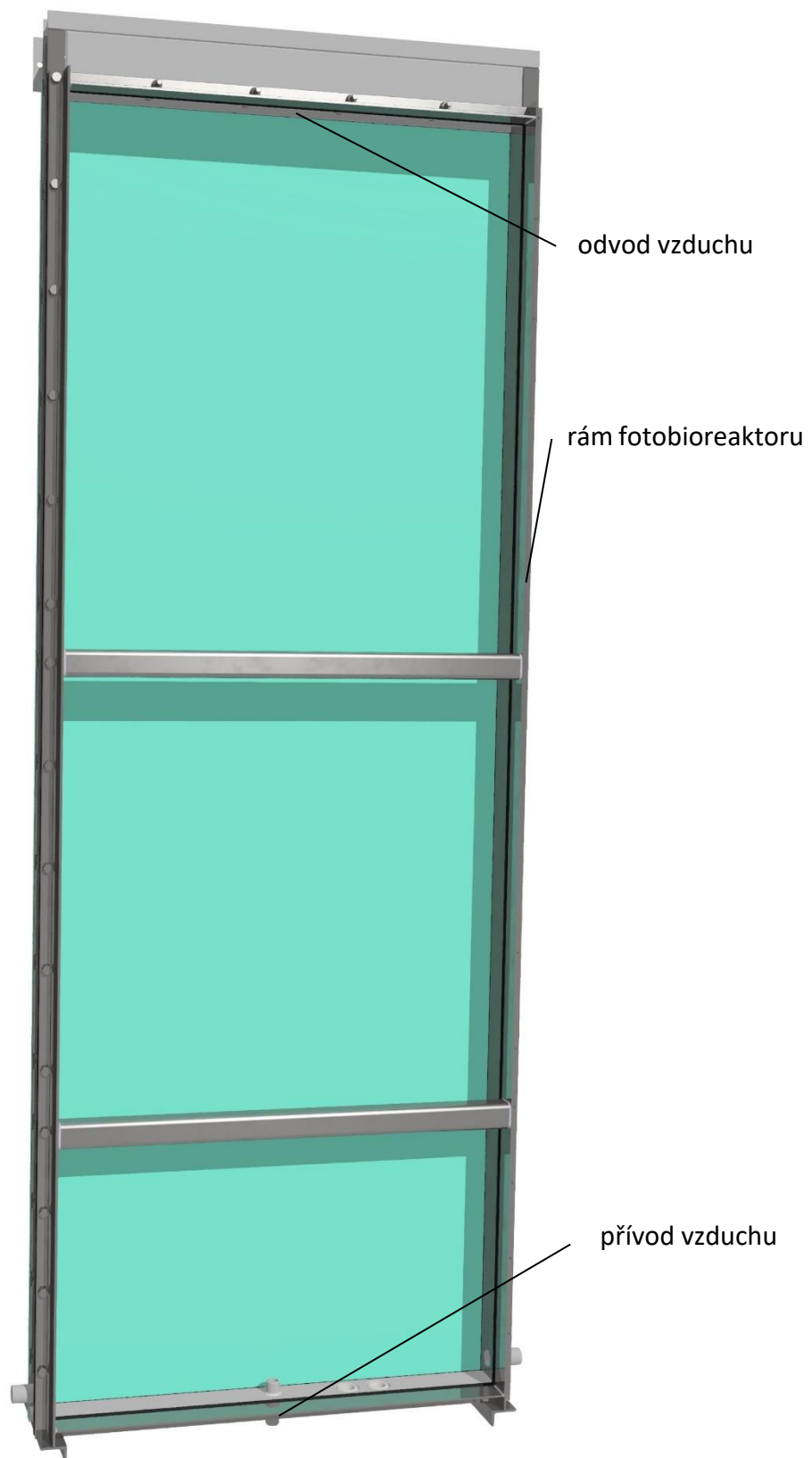
Mikrořasy jsou využívány v potravinářském, farmaceutickém i chemickém průmyslu. Uklývají v sobě ale mnohem vyšší potenciál. Příkladem je zakomponování kultivačních systémů do procesu čištění spalin z průmyslových podniků. Spaliny obsahují poměrně velké množství oxidu uhličitého a je tak možné je využít k provzdušňování systémů. Z takto vyprodukované biomasy pak lze vyrobit biopaliva třetí generace. Tento proces je ovšem v dnešní době nerentabilní a je třeba se věnovat optimalizaci jeho jednotlivých částí, jako například aerace.

Aerace slouží k přenosu hmoty mezi aeračním plynem a kultivačním médiem. Růst mikrořas kromě světla potřebného k fotosyntéze závisí právě na dodání dostatečného množství oxidu uhličitého a odebrání vyprodukovaného kyslíku. V deskových fotobioreaktorech, které v porovnání s ostatními systémy dosahují vysoké výtěžnosti, ovšem tvoří aerace značnou část provozních nákladů. Ty jsou kromě energetických vstupů tvořeny hlavně cenou stlačeného plynu. Pro zajištění rentability procesu kultivace mikrořas je tedy třeba proces aerace optimalizovat a zajistit co nejvyšší přenos hmoty při snížení spotřeby aeračního plynu.

Cílem praktické části práce bylo zhotovení aeračního elementu poloprovozního deskového fotobioreaktoru na základě laboratorních výsledků práce Ing. Klimoviče. Konkrétní cíle byly definovány následovně:

- definice provozních parametrů podstatných pro pěstování mikrořas v poloprovozním či průmyslovém měřítku
- optimalizace a zhotovení aeračního elementu pro poloprovozní deskový fotobioreaktor na základě dřívějších poznatků
- testování aeračního elementu při stanovených optimálních provozních podmínkách
- vyhodnocení experimentálních měření a návrh případných optimalizací konstrukčního řešení

Základem konstrukce poloprovozního deskového fotobioreaktoru je ocelový rám, který je z přední a zadní strany uzavřen transparentními deskami. Vnitřní rozměry jsou  $700 \times 1950 \times 56 \text{ mm}$  (šířka x výška x hloubka) a objem fotobioreaktoru je  $76 \text{ l}$ . Aerační člen je pomocí šroubení připevněn v jeho spodní části, odkud je přiváděn vzduch. Vzduch je z fotobioreaktoru odváděn otvorem v horní části, jak je znázorněno na Obr. 14.



**Obr. 14** Model poloprovozního fotobioreaktoru

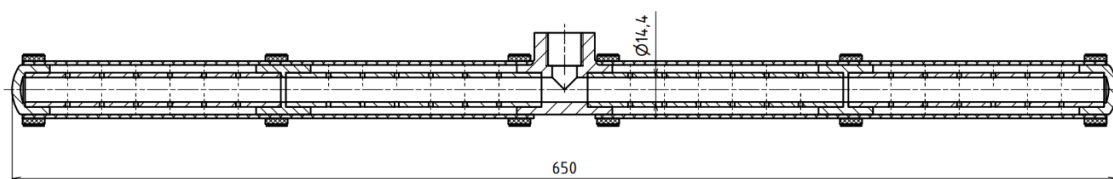
## 7. Aerační element poloprovozního fotobioreaktoru

### Popis konstrukce

Vzhledem k výsledkům experimentů Ing. Klimoviče byla pro výrobu aeračního členu (Obr. 15 a Obr. 16) zvolena membrána JetFlex vyrobené z gumy EPDM. Membrána je pomocí stahovacích potrubních objímek připevněna na nosnou konstrukci tvořenou armaturami a PPR trubkami DN20 PN16. Mezi membránou a objímkami jsou pro lepší těsnost a zamezení deformace pórů umístěny pruhy těsnění. Plyn je přiveden do T-kusu s vnitřním trubkovým závitem G1/2" a dále pokračuje do obou větví. Ty jsou tvořeny vždy 2 trubkami s navrtanými otvory, spojenými spojkou a zaslepenými koncovkou. Otvory v trubkách se plyn dostane do prostoru mezi nosnou konstrukcí a membránou a po dosažení potřebného tlaku dojde k otevření pórů a plyn tak může procházet ven.



Obr. 15 Model aeračního elementu poloprovozního deskového fotobioreaktoru



Obr. 16 Řez modelem aeračního elementu

Pro výrobu aeračního členu byl využit materiál uvedený v Tab. 5:

Tab. 5 Soupis materiálu pro výrobu aeračního členu

Položka	Množství
PPR T-kus DN20 PN16 vnitřní závit G1/2"	1 ks
PPR spojka DN20 PN16	2 ks
PPR koncovka DN20 PN16	2 ks
PPR trubka DN20 PN16	0,7 m
Porézní membrána	0,7 m
Těsnění	0,6 m
Potrubní stahovací objímka DN32-40	6 ks

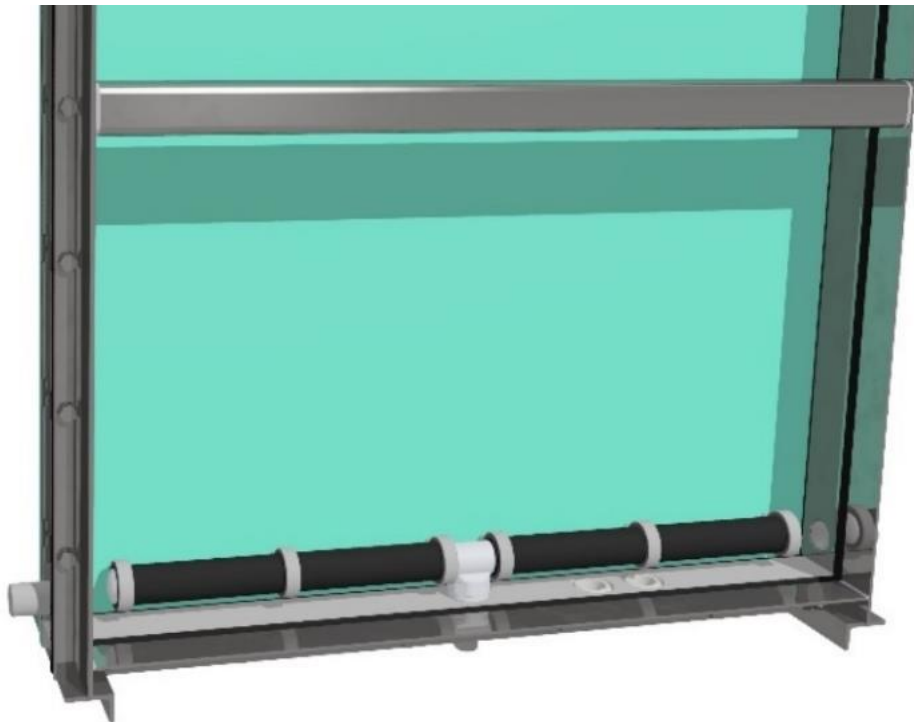
## Výroba a montáž

K sestavení aeračního členu byl dále využit svinovací metr, stříhací kleště, svářečka na PPR trubky, vrtačka, vrták s průměrem 3 mm, nůžky a šroubovák. Postup výroby aeračního členu byl následovný

### *Postup výroby:*

- rozměření a nastříhání PPR trubek na délku 150 mm stříhacími kleštěmi
- svaření trubek a armatur dle Obr. 16 svářečkou na PBR trubky
- navrtání šesti děr do každé z trubek vrtákem
- ustřížení dvou kusů membrány a šesti pásků těsnění odpovídajících rozměrům konstrukce
- navlečení membrány na konstrukci a zjištění potrubními objímkami podloženými pásky těsnění

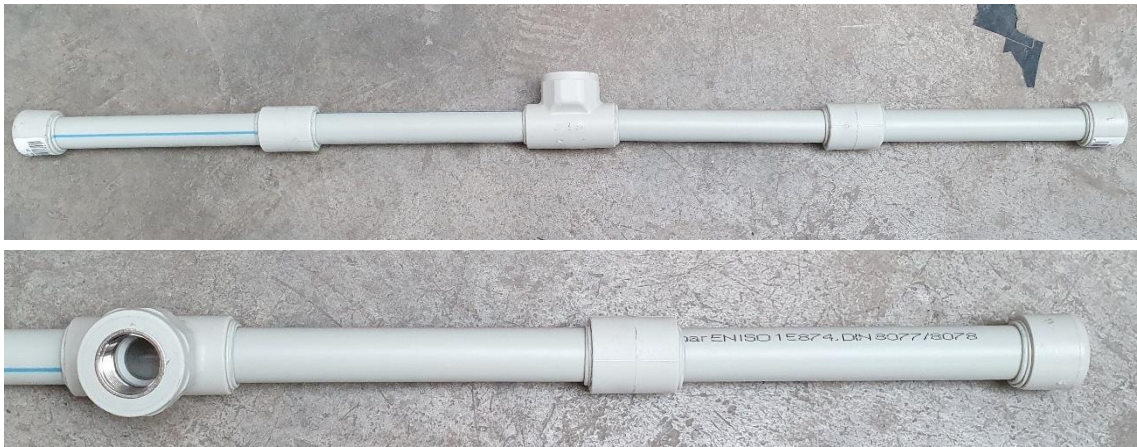
Dle uvedeného postupu byl zkonstruován aerační člen, dokumentace výroby je na Obr. 18. Aerační člen je pomocí šroubení připevněn k hrdlu pro přívod vzduchu, umístěném na dně fotobioreaktoru (viz Obr. 17). Kvůli netěsnostem mezi membránami a T-kusem byly membrány dodatečně oblepeny páskou.



**Obr. 17** Model aeračního členu v rámu fotobioreaktoru



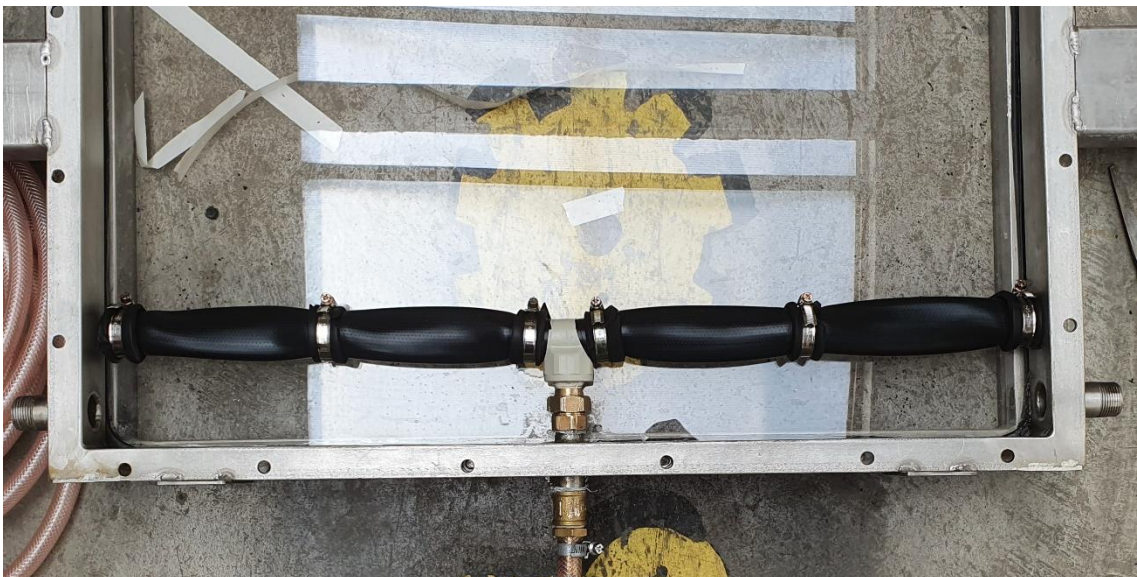
a)



b)



c)



**Obr. 18** Výroba a instalace aeračního členu a) výroba konstrukce, b) navlečení membrán, c) instalace aeračního členu do komory fotobioreaktoru

## 8. Experiment

### 8.1 Provozní podmínky

Experiment byl proveden 20.5.2022, teplota vzduchu v laboratoři byla 22 °C a teplota vody v komoře fotobioreaktoru byla 20 °C.

Zkoumané provozní podmínky byly přizpůsobeny kmenu *Chlorella vulgaris*, pro které je kritický průtok roven 0,16 vvm [25]. Pro objem poloprovozního fotobioreaktoru odpovídá tato hodnota objemovému průtoku plynu  $\dot{V}_g = 10,79 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Provozní podmínky měření byly zvoleny v rozsahu 0 – 23,33  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  tak, aby bylo možné pozorovat vliv objemového průtoku na tvorbu bublin a homogenitu probublávání.

Kultura mikrořas má i při vyšších koncentracích hustotu srovnatelnou s hustotou vody  $\rho_l = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [41]. Díky tomu lze využít parametry naměřené pro systém voda – vzduch, kde dynamická viskozita  $\mu_l = 0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  a povrchové napětí  $\sigma = 0,07 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  [36]. Pro tyto hodnoty je dle rovnic (17), (22) a (23) možné sestavit Tab. 6 předpokládaného průměru bublin. Rovnice (24) a (25) závisí na průměru pórů membrány, který ovšem pro různé hodnoty průtoku plynu výrobce neuvádí a lze je tak tak odvodit zpětně na základě výsledků měření. Je tedy použit průměr  $d_h = 0,25 \text{ mm}$  určený Ing. Klimovičem a výsledky těchto vztahů jsou tak konstantní.

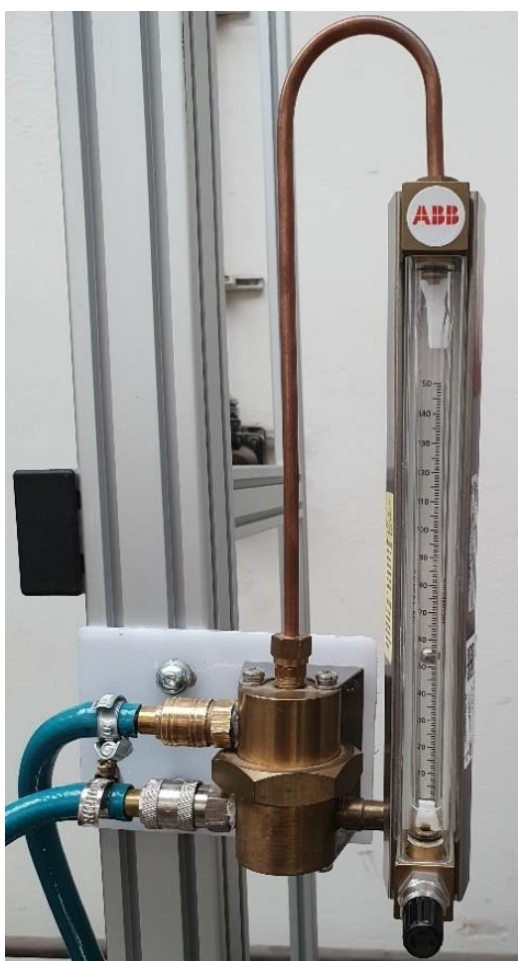
Tab. 6 Výpočty průměru bubliny

$\dot{V}_g \text{ [l} \cdot \text{min}^{-1}]$	$d \text{ [mm]}$				
	Rovnice (17)	Rovnice (22)	Rovnice (23)	Rovnice (24)	Rovnice (25)
2,33	13,96	13,96	13,94	3,52	2,18
4,67	18,41	18,41	18,4	3,52	2,18
7,00	21,65	21,65	21,64	3,52	2,18
9,33	24,29	24,29	24,28	3,52	2,18
12,13	26,96	26,97	26,97	3,52	2,18
14,00	28,55	28,56	28,56	3,52	2,18
16,33	30,37	30,38	30,38	3,52	2,18
18,67	32,04	32,04	32,04	3,52	2,18
21,00	33,58	33,59	33,59	3,52	2,18
23,33	35,03	35,03	35,03	3,52	2,18

Je patrně, že přesné řešení dané vztahem (17) se ani při vyšším objemovém průtoku zásadně neliší od přibližného řešení rovnic (22) a (23). Tyto vztahy ale určují výrazně vyšší průměry bublin než vztahy (24) a (25). Může to být dáno tím, že byly navrženy a prověřeny pro oddělené trysky, a nikoliv pro membrány, kde dochází k ovlivňování jednotlivých bublin již při jejich vzniku.

## 8.2 Sestava experimentu

Pro měření průtoku vzduchu byl použit plováчковý průtokoměr ABB FAG6100 (Obr. 19), který umožňuje maximální průtok plynu  $35 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , maximální tlak je při  $38 \text{ }^\circ\text{C}$  roven  $1400 \text{ kPa}$ . Stupnice průtokoměru má rozsah od 0 do  $150 \text{ mm}$ . Vzduch byl do průtokoměru dodáván z centrálního kompresoru a dále byl hadicí přiveden přímo do aeračního elementu.



Obr. 19 Průtokoměr ABB FAG6100

Pro záznam měření byla použita kamera GoPro HERO 5 Black, která umožňuje při rozlišení 720p nahrávat 240 snímků za vteřinu. Kamera byla umístěna na stativu před přední stěnou fotobioreaktoru. Jako etalon pro určení velikosti bublin a měření jejich dráhy byl použit pruh milimetrového papíru. Pro zaznamenání celého fotobioreaktoru byl za účelem rozhodnutí o režimu proudění použit fotoaparát CASIO EX-FH25 a výška hladiny byla měřena svinovacím metrem.

### 8.3 Postup měření

Cílem měření bylo určit velikost bublin, jejich rychlost, zadrž vzduchu v médiu a režim provzdušňování (Tab.7).

Tab.7 Provozní parametry experimentu

typ parametru	parametr	symbol parametru	základní jednotka
konstantní	objem vsádky	$V$	$m^3$
proměnný	objemový průtok	$\dot{V}_g$	$m^3 \cdot s^{-1}$
měřený	zadrž vzduchu	$\varepsilon_g$	–
	rychlost bubliny	$u$	$m \cdot s^{-1}$
	průměr bubliny	$d_b$	$m$

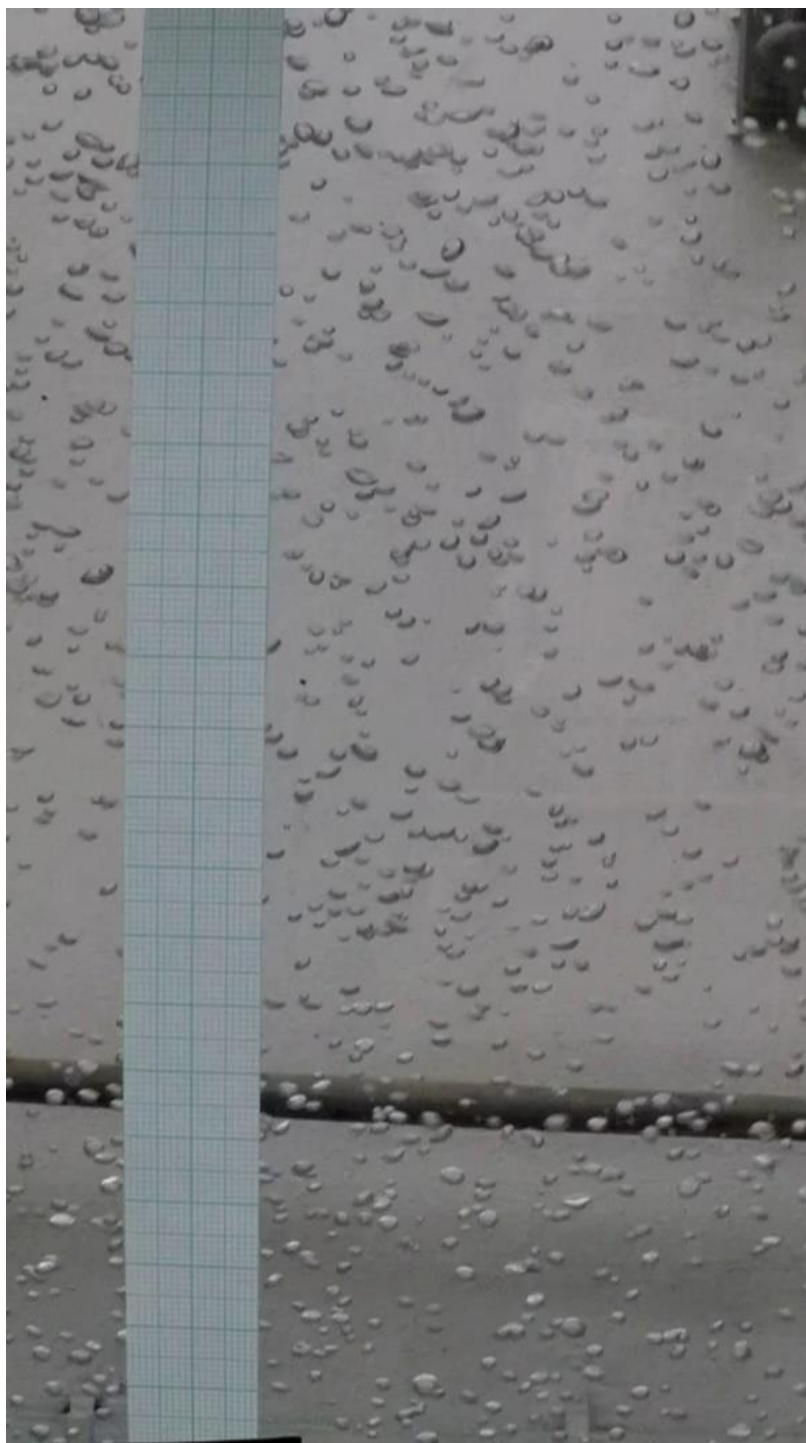
Měření bylo provedeno od hodnoty 10 mm na stupnici průtokoměru, která odpovídá objemovému průtoku vzduchu  $\dot{V}_g = 2,33 l \cdot min^{-1}$ . Objemový průtok byl na průtokoměru zvyšován po 10 mm až do hodnoty 100 mm, tedy  $23,33 l \cdot min^{-1}$ . Vzhledem k tomu, že je při provzdušňování třeba počítat se růstem hladiny, byla komora fotobioreaktoru zaplněna do výšky  $H_0 = 1720 mm$ . Celkový objem vody byl tedy 67 l a ideální objemový průtok plynu pro kmen mikrořas *Chlorella vulgaris* 0,16 vvm odpovídá  $10,79 l \cdot min^{-1}$ .

Pro každou hodnotu  $\dot{V}_g$  byly po ustálení pořizovány dva záznamy. V jednom případě byla kamera s etalonem umístěna před středem komory a ve druhém případě v pravém spodním rohu. Bylo pořízeno celkem 20 záznamů dlouhých 20 až 30 vteřin. Pomocí svinovacího metru byla také změřena výška hladiny  $H [m]$  pro každou hodnotu objemového průtoku plynu. Naměřené hodnoty byly zaznamenány a vyhodnoceny. Za účelem rozhodnutí o režimu proudění byly pořízeny fotografie a záznamy celé komory fotobioreaktoru při všech hodnotách  $\dot{V}_g$ .



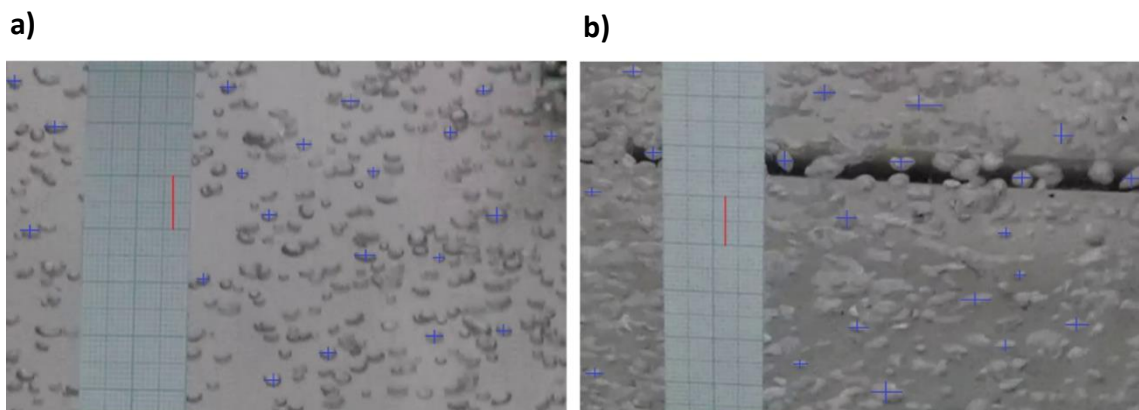
## 8.4 Vyhodnocení měření

Průměrná rychlost bubliny  $u_b [m \cdot s^{-1}]$  byla určena ze záznamů kamery na základě měření času, po který jednotlivé bubliny stoupaly na zvoleném úseku. Jeden snímek kamery umístěné ve středu komory je na Obr. 20, pro tento případ byl zvolen úsek 200 mm. Pro každou polohu kamery bylo pozorováno šest jednotlivých bublin v různých časových úsecích záznamů. Výsledná hodnota rychlosti pro daný průtok plynu byla určena jako aritmetický průměr jednotlivých měření.



**Obr. 20** Měření rychlosti bublin při objemovém průtoku  $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Průměr bubliny  $d_b$  [m] byl stanoven z jednotlivých snímků záznamů, jak je naznačeno na Obr. 21. K měření byla použita aplikace eleif.net, která umožňuje na základě vytyčení referenční délky (v tomto případě strany čtverce na milimetrovém papíře) určit délku zvolené úsečky. Vzhledem k možné deformaci bublin při vyšším průtoku vzduchu byl měřen vertikální a horizontální průřez bubliny a hodnota průměru bubliny byla spočtena jako aritmetický průměr těchto průřezů. Pro každou hodnotu průtoku vzduchu a polohu kamery byl z příslušného záznamu zvolen jeden snímek, na kterém bylo provedeno měření dvaceti bublin. Výsledný průměr bubliny při daném průtoku vzduchu byl určen jako aritmetický průměr velikostí jednotlivých bublin.



**Obr. 21** Měření velikosti bublin při objemovém průtoku plynu a)  $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  
b)  $\dot{V}_g = 18,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Zadrž plynu  $\varepsilon_g$  [–] byla určena dle rovnice (26) na základě porovnání výšky hladiny před začátkem provzdušňování  $H_0$  [m] a po jejím ustálení  $H$  [m] při dané hodnotě průtoku vzduchu.

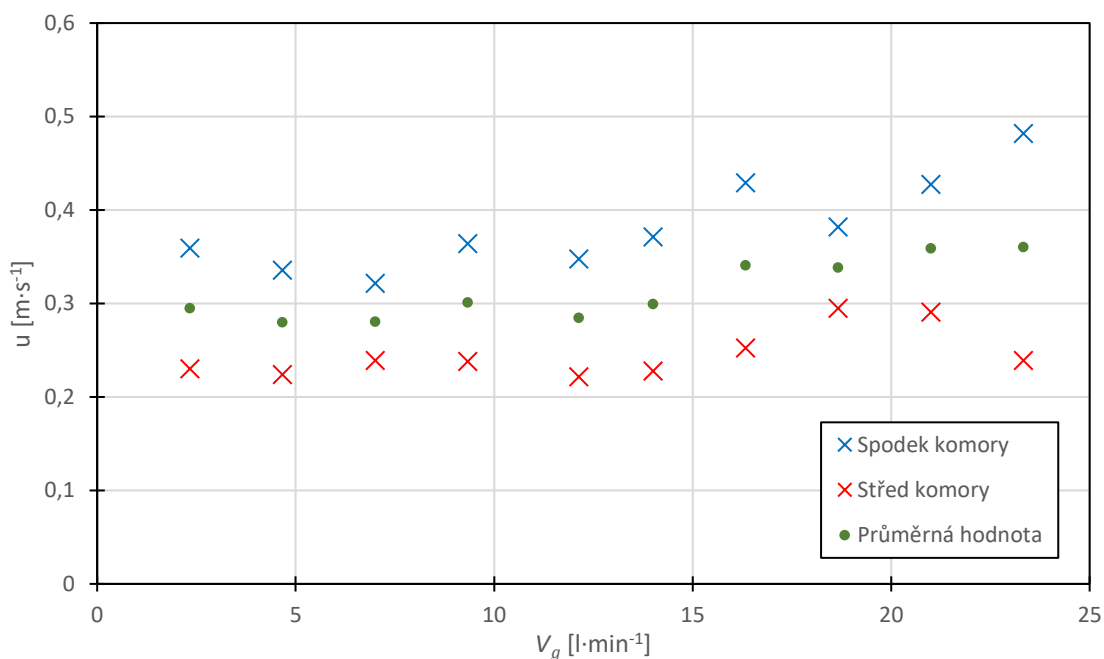
## 8.5 Výsledky měření

V rámci vyhodnocování experimentu byla na základě pořízených záznamů pozorována velikost a rychlost proudění bublin, homogenita provzdušňování a doba zadržetí vzduchu. Pro větší názornost jsou jako Příloha 1 a Příloha 2 přiložena videa. Ukázky z měření jsou také v práci zobrazeny formou obrázků.

### Rychlost bublin

Měření rychlosti bublin bylo provedeno na základě záznamu kamery umístěné uprostřed fotobioreaktoru a v jeho pravé spodní části.

Z grafu na Obr. 22 je patrné, že zatímco ve spodní části je trend rychlosti spíše rostoucí, ve vrchní části je rychlost až do objemového průtoku  $\dot{V}_g = 14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  v podstatě konstantní. Po dosažení maxima při  $\dot{V}_g = 21 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  pak rychlost začíná klesat. Lze to přisuzovat proudě, níže zmíněnému v kapitole Homogenita aerace. Proud místy způsoboval úplné zastavení bublin a byl patrný obzvláště při vysokých hodnotách objemového průtoku. Proudě také přisuzují rozdíl rychlosti ve spodní a střední části fotobioreaktoru. Při optimální hodnotě objemového průtoku  $\dot{V}_g = 10,79 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , tedy  $0,16 \text{ vvm}$ , by byla na základě lineární interpolace průměrná rychlost stoupání bubliny  $u = 0,293 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

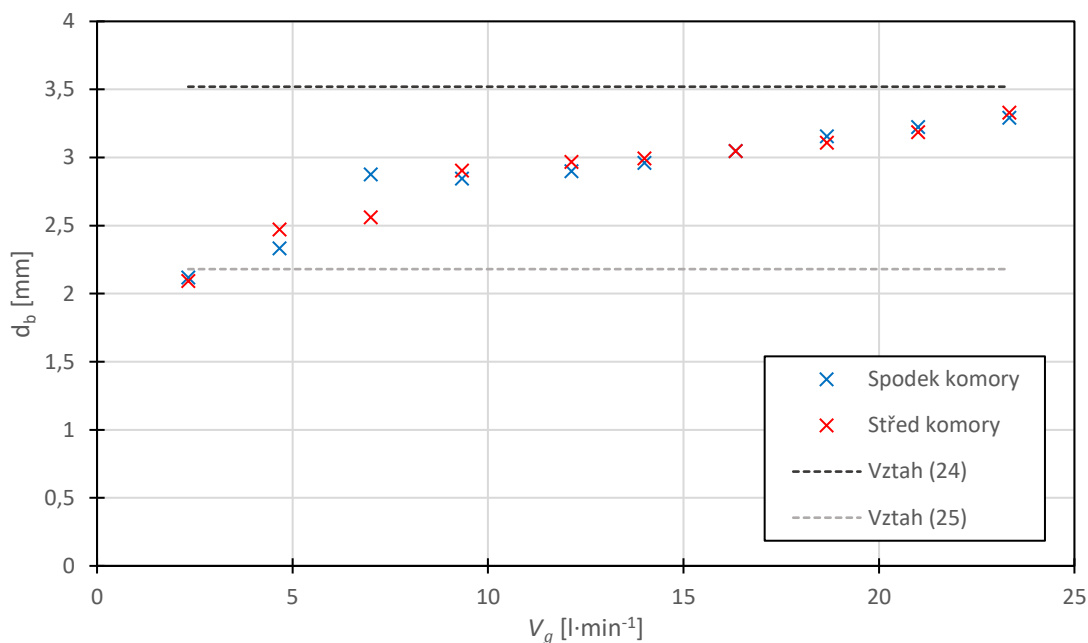


Obr. 22 Závislost rychlosti bublin na objemovém průtoku vzduchu

## Velikost bublin

Určení velikosti bublin proběhlo na základě jednotlivých snímků záznamu vždy zvlášť pro střední a spodní část fotobioreaktoru, jak je naznačeno na Obr. 21.

. Ze vzájemného porovnání jednotlivých měření na Obr. 23 lze pozorovat, že velikost bublin zůstává při průchodu médiem v podstatě stejná a se zvyšujícím se objemovým průtokem vzduchu se zvětšuje. Při  $\dot{V}_g = 14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  bylo možné pozorovat čím dál větší množství větších bublin zploštělých ve vertikálním směru. Ze záznamů také



bylo patrné, že se při vyšším  $\dot{V}_g$  stoupající bubliny místy spojují.

**Obr. 23** Závislost průměru bublin na objemovém průtoku vzduchu

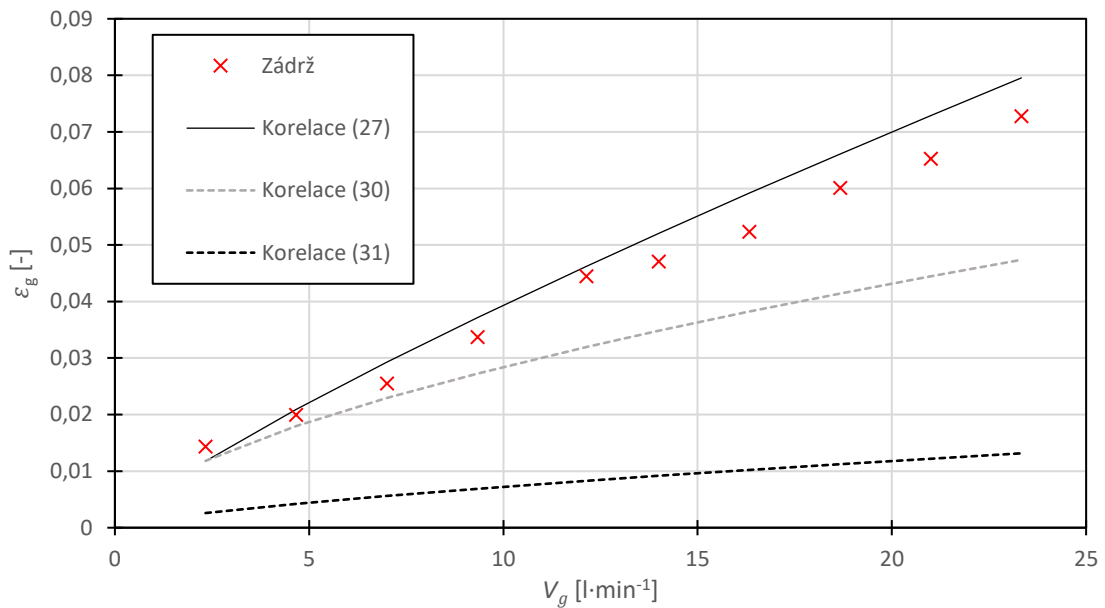
Změřená velikost bublin se poměrně výrazně liší od výsledků rovnice (23) uvedených v Tab. 6 a to až o jeden řád. Může to být způsobeno malými rozestupy mezi póry, a tedy vzájemným ovlivňováním se vznikajících bublin, jelikož autoři vztahu jej ověřovali pro samostatné trysky. Dalším faktorem je rozdílné rozevření pórů membrány při rozdílném objemovém průtoku vzduchu. Naměřené hodnoty se pohybují mezi výsledky vztahů (24) a (25). Při optimální hodnotě  $\dot{V}_g$  by na základě lineární interpolace byla průměrná velikost bubliny  $d_b = 2,9 \text{ mm}$ .

## Zádrž vzduchu

Zádrž vzduchu byla na základě měření výšky hladiny, jíž lze pozorovat na Obr. 26, Obr. 27 a Obr. 28, určena ze vztahu (26). Data byla zpracována do grafu (Obr. 24), ve kterém je porovnána s korelací danou vztahem (27). Z grafu je patrné, že s rostoucím průtokem vzduchu roste zádrž téměř lineárně. Z lineární interpolace naměřených dat plyne, že při optimálním objemovém průtoku vzduchu  $\dot{V}_g = 10,79 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  by zádrž



byla  $\varepsilon_g = 0,0392$ . Při použití korelace (27) je při těchto podmínkách  $\varepsilon_g = 0,0419$  a je patrné, že tato korelace vystihuje výsledky oproti vztahům (30) a (31) poměrně přesně.



**Obr. 24** Závislost zádrže vzduchu na objemovém průtoku

### Homogenita aerace

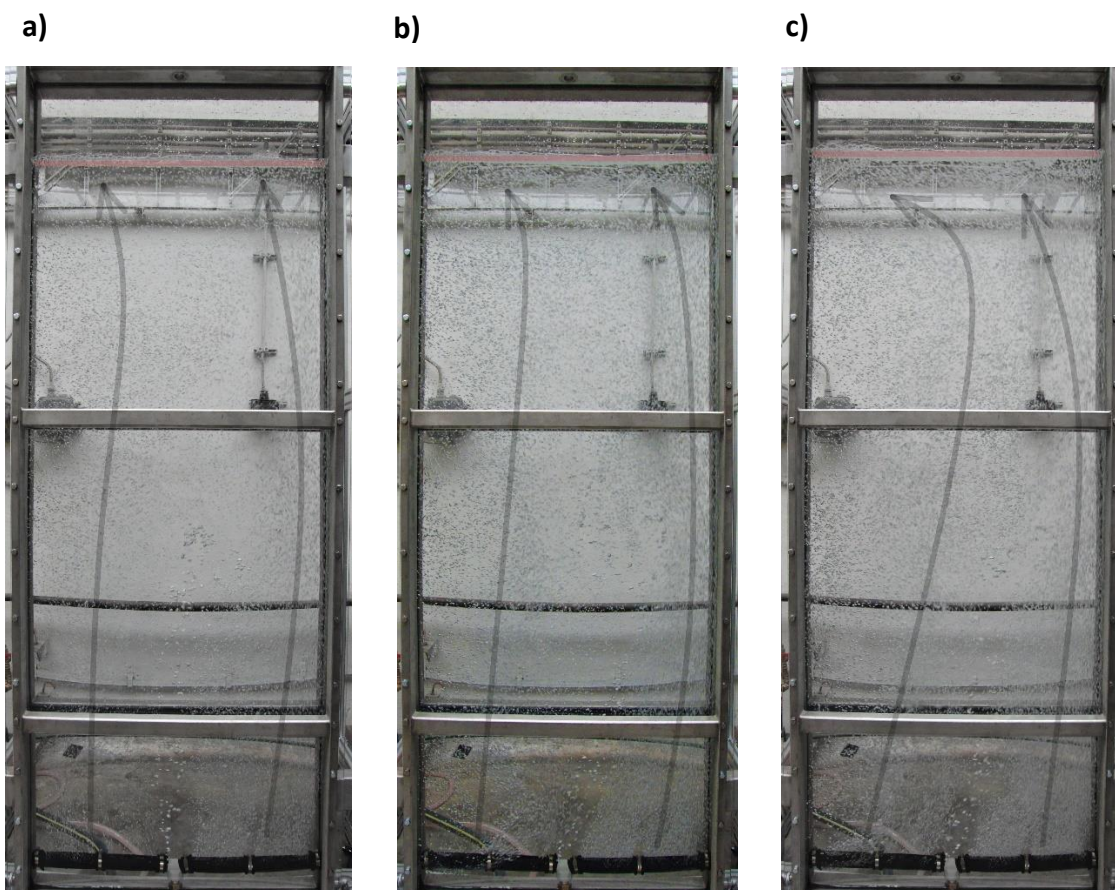
V intervalu  $\dot{V}_g = 2,33$  až  $12,13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , tedy v oblasti optimálního průtoku vzduchu, bylo dosaženo homogenního probublávání. Od objemového průtoku vzduchu  $\dot{V}_g = 9,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  bylo možné pozorovat proud naznačený na Obr. 26, Obr. 27 a Obr. 28. Proud směřoval od pravého ramene aeračního elementu vzhůru a dále proti směru hodinových ručiček podél levé strany dolů, kde se přibližně v polovině výšky fotobioreaktoru setkával s proudem bublin z levého ramene aerátoru. Proud byl tím silnější, čím vyšší byl nastavený průtok vzduchu. Po překročení  $\dot{V}_g = 21 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  proud místy způsoboval úplné zastavení bublin. To vedlo k nashromáždění bublin a změně režimu proudění na přechodový. I na základě grafu na Obr. 11 lze ovšem konstatovat, že nedošlo k přechodu do heterogenního režimu proudění, jelikož zádrž vzduchu ani při nejvyšším měřeném objemovém průtoku vzduchu nezačala klesat.

Z Obr. 25 je patrné, že vlivem netěsnosti mezi membránou a T-kusem u levého ramene vznikaly výrazně větší bubliny při všech hodnotách průtoku. Tato netěsnost je způsobena nedostatečnou dosedací plochou membrány na T-kus. Úniku vzduchu nezabránilo ani přelepení membrány páskou. Řešením by tedy mohlo být využití T-kusu s širšími rameny, nebo připojení nátrubků z obou stran T-kusu. To by ovšem způsobilo zmenšení plochy membrány, přes kterou může procházet vzduch, a mohlo by se tak změnit její chování. Další možností je nahrazení kovových stahovacích objímek užšími stahovacími páskami.



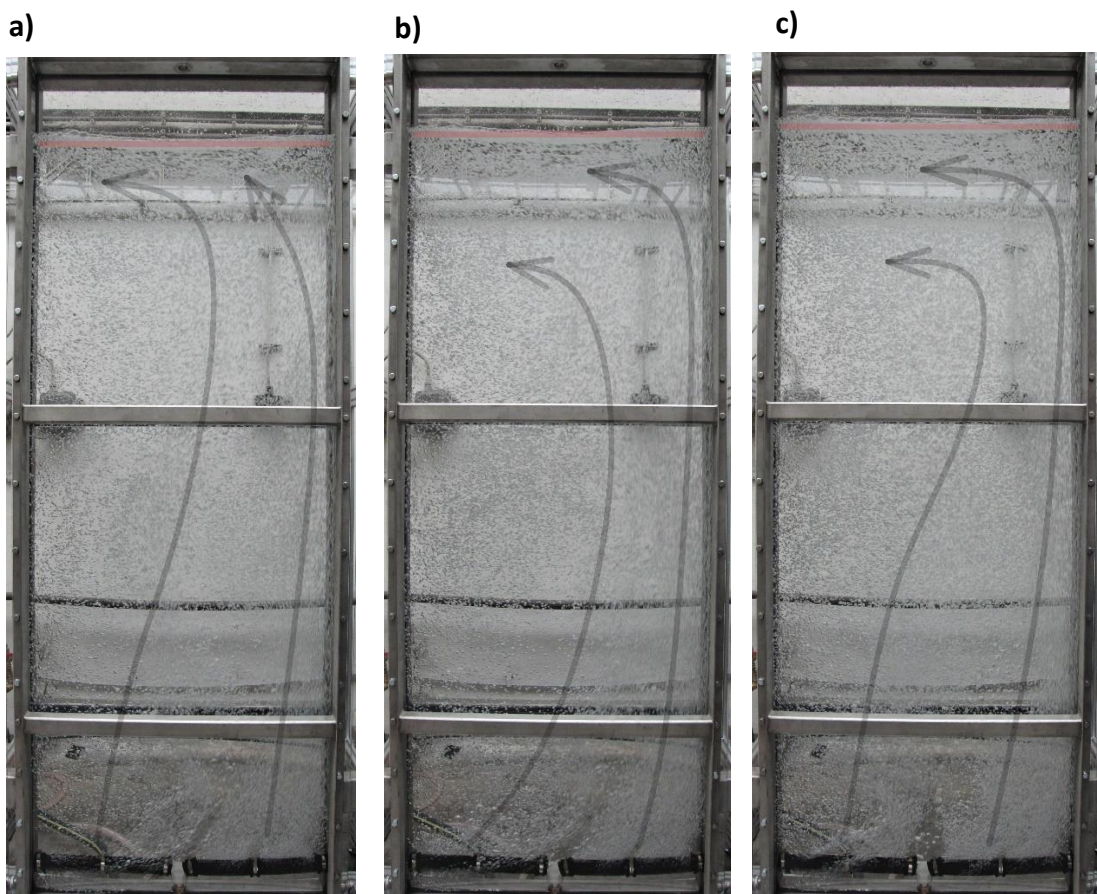
*Obr. 25* Bubliny způsobené netěsností

Výše zmíněný proud mohl být vyvolán právě většími bublinami způsobenými netěsností. Vzhledem k tomu, že při kultivaci mikrořas je co největší zádrž plynu žádoucí, může mít vzniklý proud na kultivaci pozitivní vliv. Při zpomalení nebo úplném zastavení bublin se zvyšuje doba jejich zdržení v médiu a tedy čas pro výměnu hmoty. Důsledkem by tedy mohl být přenos většího množství oxidu uhličitého do kultivačního média. Vznikajícím proudem je také zajištěno lokální promíchání suspenze, což může být pro kultivaci mikrořas přínosné.

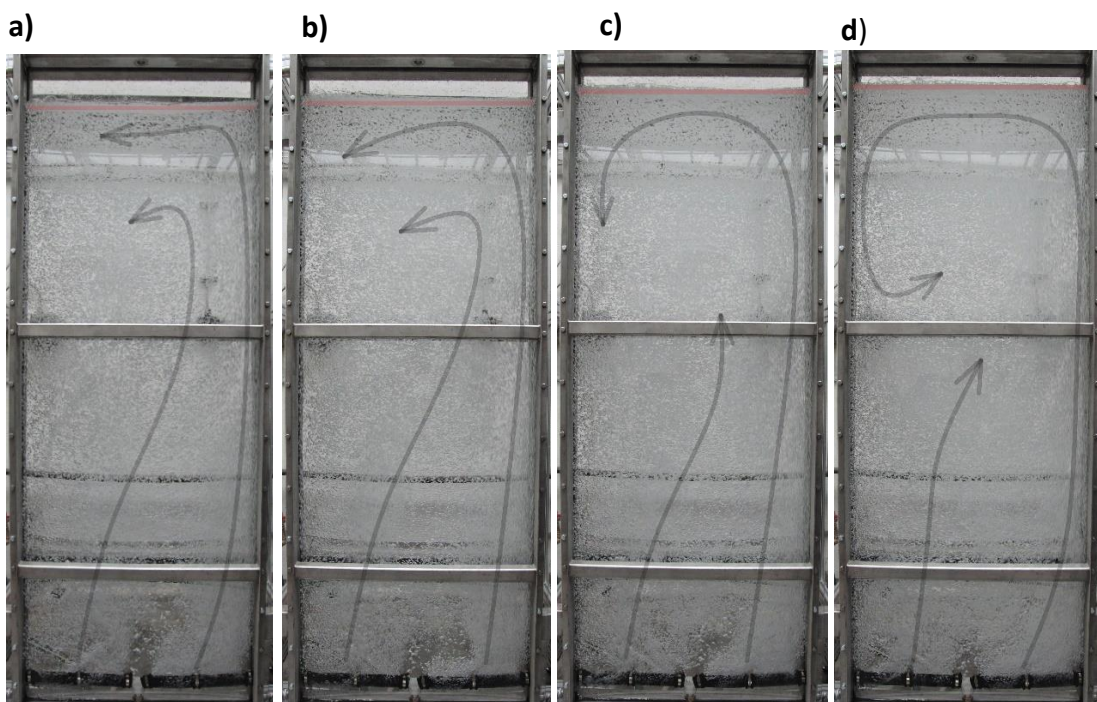


**Obr. 26** Záznam provzdušňování při objemovém průtoku a)  $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b)  $\dot{V}_g = 4,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c)  $\dot{V}_g = 7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$





**Obr. 27** Záznam provzdušňování při a)  $\dot{V}_g = 9,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b)  $\dot{V}_g = 12,13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c)  $\dot{V}_g = 14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



**Obr. 28** Záznam provzdušňování při a)  $\dot{V}_g = 16,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b)  $\dot{V}_g = 18,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c)  $\dot{V}_g = 21 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , d)  $\dot{V}_g = 23,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

## Smyková rychlost a napětí

Na základě naměřeného průměru bublin a rychlosti jejich stoupání byla pomocí rovnice (33) určena smyková rychlost  $\gamma$  [ $s^{-1}$ ] a dále bylo dle vztahu (32) určeno napětí  $\tau$  [ $Pa$ ]. Při výpočtu byla použita dynamická viskozita vody  $\mu_l = 0,001 Pa \cdot s$ . Data byla zpracována do Tab. 8 ze které je patrné, že nejvyšší dosažené napětí bylo rovno  $0,28 Pa$  a nejvyšší smyková rychlost byla  $280,03 s^{-1}$ .

Při optimálním průtoku vzduchu pro kmen *Chlorella vulgaris* ( $0,16 vvm$ ) by bylo na základě lineární interpolace dosaženo napětí  $0,202 Pa$ , přičemž kritické napětí pro tento kmen je  $0,9 Pa$  [25]. Kritické napětí také nebylo překročeno pro žádný z kmenů mikrořas uvedených v Tab. 4. Tyto kmeny je tedy možné při testovaných provozních podmínkách v poloprovozním fotobiorektoru kultivovat bez toho, aby došlo k jejich poškození.

Tab. 8 Závislost smykové rychlosti a napětí na objemovém průtoku vzduchu

$\dot{V}_g$ [ $l \cdot min^{-1}$ ]	$\gamma$ [ $s^{-1}$ ]	$\tau$ [ $Pa$ ]
2,33	280,03	0,280
4,67	233,12	0,233
7,00	206,30	0,206
9,33	209,55	0,210
12,13	194,00	0,194
14,00	201,17	0,201
16,33	223,58	0,224
18,67	216,16	0,216
21,00	224,13	0,224
23,33	217,65	0,218

## 9. Závěr

V úvodní části bakalářské práce je popsáno využití mikrořas z hlediska výroby produktů určených k prodeji, ale i jako součást řešení konkrétní problematiky například v biorafineriích. Jsou také popsány základní parametry ovlivňující proces kultivace mikrořas a nejvyužívanější systémy určené k jejich pěstování, včetně porovnání jednotlivých systémů.

Další část je věnována probublávání kultivačního média. Jsou popsány hlavní způsoby provzdušňování se zaměřením na pneumatickou aeraci. Pro tu je rozebrána problematika tvorby bublin, režimy proudění při pobublávání kapaliny plynem, vzájemný přenos hmoty i zádrž plynu v kultivačním médiu.

Experimentální část této práce navazuje na diplomovou práci Ing. Vojtěcha Klimoviče, která se věnovala probublávání fotobioreaktoru v laboratorním měřítku. Na základě této práce bylo zvoleno konstrukční řešení aeračního členu, který k tvorbě bublin využívá porézní membránu JetFlex. Byl navržen a zhotoven aerační člen přizpůsobený velikosti testovaného poloprovozního fotobioreaktoru. Po sestavení fotobioreaktoru a připojení aeračního členu byla provedena sada měření. Tato měření byla zaměřena na tvorbu bublin, jejich velikost a rychlost stoupání a na homogenitu provzdušňování. Jelikož má suspenze mikrořas vlastnosti podobné vodě a k provzdušňování je nejčastěji využíván vzduch s obsahem oxidu uhličitého do 5 %, byla měření provedena na systému voda – vzduch. Z výsledků experimentu plyne, že zvolené konstrukční řešení je pro aeraci poloprovozního deskového fotobioreaktoru vhodné. V oblasti optimálního objemového průtoku vzduchu 0,16 *vvm* bylo dosaženo homogenního režimu proudění a nebylo překročeno kritické napětí, které by způsobilo poškození kultivovaných mikrořas.

Během experimentu se ukázalo, že nebylo dosaženo dostatečné těsnosti mezi membránou a T-kusem konstrukce aeračního členu. To vedlo ke vzniku větších bublin, které ovšem na homogenitu proudění neměly zásadní vliv. Vhodným řešením se zdá být využití T-kusu s delšími rameny, která by zvýšila plochu kontaktu mezi membránou a stěnou. Další možností je nastavení T-kusu nátrubky, což by ovšem snížilo plochu přímého kontaktu membrány se vzduchem a membrána by se tak mohla při optimálních provozních podmínkách chovat rozdílně.

Cílem další práce by mělo být ověření funkčnosti aeračního členu při kultivaci mikrořas v poloprovozním deskovém fotobioreaktoru a další optimalizace jeho konstrukce pro dosažení lepší těsnosti.

## 10. Bibliografie

- [1] MASOJÍDEK, Jiří, Richard LHOTSKÝ, Jiří KOPECKÝ a Ondřej PRÁŠIL. *Mikrořasy - solární továrna v jedné buňce*. Vydání 1. Praha: Středisko společných činností AV ČR v.v.i., 2016. Věda kolem nás. Výzvy a otázky, 45. Dostupné také z: <https://www.academia.cz/edice/kniha/mikrorasy-solarni-tovarna-v-jedne-bunce>
- [2] SHOW, Pau, Wai CHEAH, Tau LING, Joon JUAN a Joon JUAN. Biosequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> and flue gas-containing CO<sub>2</sub> by microalgae. *Bioresource Technology* [online]. 2015, **184**, 190-201 [cit. 2021-11-05]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.11.026
- [3] ROSLI, Siti, Wan AMALINA KADIR, Chung WONG, Fon HAN, Jun LIM a Man LAM. Insight review of attached microalgae growth focusing on support material packed in photobioreactor for sustainable biodiesel production and wastewater bioremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **134** [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.110306
- [4] RIZWAN, Muhammad, Ghulam MUJTABA, Sheraz MEMON, Kisay LEE a Naim RASHID. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **92**, 394-404 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.04.034
- [5] TAN, Xin, Man LAM, Yoshimitsu UEMURA, Jun LIM a Keat LEE. Cultivation of microalgae for biodiesel production: A review on upstream and downstream processing. *Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2018, **26**(1), 17-30 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cjche.2017.08.010
- [6] MILANO, Jassinnee, Hwai ONG, H.H. MASJUKI, W.T. CHONG, Man LAM, Ping LOH a Viknes VELLAYAN. Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **58**, 180-197 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.12.150
- [7] SINGH, Vishal a Vishal MISHRA. Exploring the effects of different combinations of predictor variables for the treatment of wastewater by microalgae and biomass production. *Biochemical Engineering Journal* [online]. 2021, **174** [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.bej.2021.108129
- [8] MORILLAS-ESPAÑA, Ainoa, Tomas LAFARGA, Ana SÁNCHEZ-ZURANO, Francisco ACIÉN-FERNÁNDEZ a Cynthia GONZÁLEZ-LÓPEZ. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: Current

- needs and challenges. *Chemosphere* [online]. 2021, **291** [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.132968
- [9] CHOWDHURY, Harun a Bavin LOGANATHAN. Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* [online]. 2019, **20**, 39-44 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cogsc.2019.09.003
- [10] FARIED, M., M. SAMER, E. ABDELSALAM, R.S. YOUSEF, Y.A. ATTIA a A.S. ALI. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **79**, 893-913 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.199
- [11] RUIZ-RUIZ, Patricia, Adrián ESTRADA a Marcia MORALES. Carbon dioxide capture and utilization using microalgae. *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products* [online]. Brazil: Elsevier, 2020, s. 185-206 [cit. 2021-11-27]. ISBN 9780128185360. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128185360000087>
- [12] AHMAD, Imran, Norhayati ABDULLAH, Iwamoto KOJI, Ali YUZIR a Shaza EVA MUHAMMAD. Evolution of Photobioreactors: A Review based on Microalgal Perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, **1142**(1) [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1142/1/012004
- [13] ZÍTKOVÁ, Jana. *VLIV ZVÝŠENÉ KONCENTRACE OXIDU UHLIČITÉHO NA DENNÍ CHOD OBSAHU A AKTIVITY ENZYMU RUBISCO*. Brno, 2011. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30295851.pdf>. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [14] SADEGHIZADEH, Aziz, Farid FARHAD DAD, Leila MOGHADDASI a Rahbar RAHIMI. CO<sub>2</sub> capture from air by *Chlorella vulgaris* microalgae in an airlift photobioreactor. *Bioresource Technology* [online]. 2017, **243**, 441-447 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2017.06.147
- [15] LIM, Yi, Meng CHONG, Su FOO a I. ILANKOON. Analysis of direct and indirect quantification methods of CO<sub>2</sub> fixation via microalgae cultivation in photobioreactors: A critical review: A critical review. *Renewable & sustainable energy reviews*. Elsevier Ltd, 2021, **137**(). ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2020.110579
- [16] RODOLFI, Liliana a Mario TREDICI, Graziella ZITTELLI, Natascia BIONDI. Photobioreactors for mass production of microalgae. *Handbook of microalgal*



- culture: applied phycology and biotechnology* [online]. Oxford, UK: John Wiley & Sons, 2013, 225-266 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1002/9781118567166.ch13
- [17] TREDICI, Mario, Liliana RODOLFI, Natascia BIONDI, Niccolò BASSI a Giacomo SAMPIETRO. Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant. *Algal Research* [online]. 2016, **19**, 253-263 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2016.09.005
- [18] BOSMA, R., J.H. DE VREE, P.M. SLEGGERS, M. JANSSEN, R.H. WIJFFELS a M.J. BARBOSA. Design and construction of the microalgal pilot facility AlgaePARC. *Algal Research* [online]. 2014, **6**, 160-169 [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2014.10.006
- [19] TERRY, Kenneth a Lawrence RAYMOND. System design for the autotrophic production of microalgae. *Enzyme and Microbial Technology* [online]. 1985, **7**(10), 474-487 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: doi:10.1016/0141-0229(85)90148-6
- [20] POSTEN, Clemens a Christian WALTER. Microalgal Biotechnology: Potential and Production. *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. 2012. ISBN 9783110225013. Dostupné také z: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&an=530553&scope=site>
- [21] SOLIMENO, Alessandro a Joan GARCÍA. Microalgae-bacteria models evolution: From microalgae steady-state to integrated microalgae-bacteria wastewater treatment models – A comparative review. *Science of The Total Environment* [online]. 2017, **607-608**, 1136-1150 [cit. 2022-05-02]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.114
- [22] APEL, A.C., C.E. PFAFFINGER, N. BASEDAHL, N. MITTWOLLEN, J. GÖBEL, J. SAUTER, T. BRÜCK a D. WEUSTER-BOTZ. Open thin-layer cascade reactors for saline microalgae production evaluated in a physically simulated Mediterranean summer climate. *Algal Research* [online]. 2017, **25**, 381-390 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2017.06.004
- [23] BĚLOHLAV, Vojtěch, Tomáš JIROUT a Lukáš KRÁTKÝ. Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. *Chemické Listy* [online]. 2018, **112**(3), 183–190 [cit. 2021-11-05]. ISSN 00092770. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85045527480&origin=resultslist>

- [24] SIROHI, Ranjna, Ashutosh KUMAR PANDEY, Panneerselvam RANGANATHAN a Shikhangi SINGH. Design and applications of photobioreactors- a review. *Bioresource Technology* [online]. 2022, **349** [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2022.126858
- [25] WANG, Chinchin a Christopher LAN. Effects of shear stress on microalgae – A review. *Biotechnology advances*. England: Elsevier Inc, 2018, **36**(4), 986-1002. ISSN 0734-9750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2018.03.001
- [26] ZHAO, Bingtao a Yaxin SU. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*. Kidlington: Elsevier Ltd, 2014, **31**(), 121-132. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.11.054
- [27] ASSUNÇÃO, Joana a F. MALCATA. Enclosed “non-conventional” photobioreactors for microalga production: A review. *Algal Research* [online]. 2020, **52** [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2020.102107
- [28] KISHI, Masatoshi, Kenji TANAKA, Shinichi AKIZUKI a Tatsuki TODA. Development of a gas-permeable bag photobioreactor for energy-efficient oxygen removal from algal culture. *Algal Research* [online]. 2021, **60** [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2021.102543
- [29] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN a Petr PRAX. *STOKOVÁNÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2535-0.
- [30] SLAVÍČKOVÁ, Kateřina a Marek SLAVÍČEK. *Vodní hospodářství obcí 1: úprava a čištění vody*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03534-4.
- [31] KLIMOVIČ, Vojtěch. *NÁVRH AERAČNÍHO ELEMENTU PRO DESKOVÝ FOTOBIOREAKTOR* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96229>. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [32] CHO, Bovinille a Robert POTT. The development of a thermosiphon photobioreactor and analysis using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*. Elsevier B.V, 2019, **363**(), 141-154. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2019.01.104
- [33] Aerators. In: *VISUAL ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL ENGINEERING EQUIPMENT* [online]. Michigan: University of Michigan, 2020 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/TransportStorage/Aerators/Aerators.html>

- [34] KIM, Hyun-Woo, Jing CHENG a Bruce RITTMANN. Direct membrane-carbonation photobioreactor producing photoautotrophic biomass via carbon dioxide transfer and nutrient removal. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **204**, 32-37 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2015.12.066
- [35] ŠÍPEK, Milan. *Základní membránové procesy*. Vydání: první. Praha;Česká Lípa: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2018, . Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/CdrN4tr4>
- [36] GADDIS, E.S. a A. VOGELPOHL. Bubble formation in quiescent liquids under constant flow conditions. *Chemical Engineering Science* [online]. 1986, **41**(1), 97-105 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: doi:10.1016/0009-2509(86)85202-2
- [37] PALADINO, Emilio a Clovis MALISKA. Virtual mass in accelerated bubbly flows. *Proceedings of the 4th European Thermal Sciences, National Exhibition Centre, Birmingham, UK*. 2004, 29-31. Dostupné také z: [https://arquivos.info.ufrn.br/arquivos/2008242042348603252780cf13b053ed/paladino\\_eurotherm.pdf](https://arquivos.info.ufrn.br/arquivos/2008242042348603252780cf13b053ed/paladino_eurotherm.pdf)
- [38] KULKARNI, Amol a Jyeshtharaj JOSHI. Bubble Formation and Bubble Rise Velocity in Gas–Liquid Systems: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2005, **44**(16), 5873-5931 [cit. 2022-05-05]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/ie049131p
- [39] KRZAN, Marcel a Kazimierz MALYSA. INFLUENCE OF FROTHER CONCENTRATION ON BUBBLE DIMENSIONS AND RISING VELOCITIES. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* [online]. 2002, **36**, 65-76 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.616.7579&rep=rep1&type=pdf>
- [40] CUI, Xuyang, Junhong YANG, Mianshan CUI, Wenwen ZHANG a Jun ZHAO. Comparative experiments of two novel tubular photobioreactors with an inner aerated tube for microalgal cultivation: Enhanced mass transfer and improved biomass yield. *Algal Research* [online]. 2021, **58** [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2021.102364
- [41] SABRI, Laith, Abbas SULTAN a Muthanna AL-DAHMAN. The cross-sectional gas holdup distribution in a split internal-loop photobioreactor during microalgae culturing using a sophisticated computed tomography (CT) technique. *Chemical Engineering Research and Design* [vol. 149]. 2019, 13-33 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: doi:10.1016/j.cherd.2019.06.017

- [42] MANJREKAR, Onkar, Yujian SUN, Lian HE, Yinjie TANG a Milorad DUDUKOVIC. Hydrodynamics and mass transfer coefficients in a bubble column photo-bioreactor. *Chemical Engineering Science* [online]. 2017, **168**, 55-66 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2017.04.016
- [43] KANTARCI, Nigar, Fahir BORAK a Kutlu ULGEN. Bubble column reactors. *Process Biochemistry* [online]. 2005, **40**(7), 2263-2283 [cit. 2022-05-26]. ISSN 13595113. Dostupné z: doi:10.1016/j.procbio.2004.10.004
- [44] BOUAIFI, Mounir, Gilles HEBRARD, Dominique BASTOUL a Michel ROUSTAN. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2001, **40**(2), 97-111 [cit. 2022-05-26]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/S0255-2701(00)00129-X
- [45] ZEDNÍKOVÁ, Mária, Sandra ORVALHO, Marie FIALOVÁ a Marek RUZICKA. Measurement of Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. *ChemEngineering* [online]. 2018, **2**(2) [cit. 2022-05-28]. ISSN 2305-7084. Dostupné z: doi:10.3390/chemengineering2020019
- [46] ZHANG, Xiaobo, Kai GUO, Wenzhe QI, Ting ZHANG a Chunjiang LIU. Gas holdup, bubble behaviour, and mass transfer characteristics in a two-stage internal loop airlift reactor with different screens. *Canadian journal of chemical engineering*. Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc, 2017, **95**(), 1202-1212. ISSN 0008-4034. Dostupné z: doi:10.1002/cjce.22767
- [47] KRISHNA, R. a S.T. SIE. Design and scale-up of the Fischer-Tropsch bubble column slurry reactor. *Fuel Processing Technology* [online]. 2000, **64**(1-3), 73-105 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: doi:10.1016/S0378-3820(99)00128-9
- [48] ZAHRADNÍK, J., M. FIALOVÁ, M. RŮŽIČKA a J. DRAHOŠ. Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science* [online]. 1997, **52**(21-22), 3811-3826 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: doi:10.1016/S0009-2509(97)00226-1
- [49] MANJREKAR, Onkar a Milorad DUDUKOVIC. Identification of flow regime in a bubble column reactor with a combination of optical probe data and machine learning technique. *Chemical Engineering Science: X* [online]. 2019, **2** [cit. 2022-03-30]. ISSN 25901400. Dostupné z: doi:10.1016/j.cesx.2019.100023

- [50] KUMAR, V a S JAIN. Plants and algae species: Promising renewable energy production source. *Emirates Journal of Food and Agriculture* [online]. 2014, **26**(8) [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: doi:10.9755/ejfa.v26i8.18364
- [51] SLEGGERS, P.M., P.J.M. VAN BEVEREN, R.H. WIJFFELS, G. VAN STRATEN a A.J.B. VAN BOXTEL. Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. *Applied Energy* [online]. 2013, **105**, 395-406 [cit. 2022-04-24]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.068

## 11. Seznam symbolů

<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$A$	$m^2$	průtočná plocha
$a$	$m \cdot s^{-2}$	zrychlení bubliny
$C$	$kg/kg$	obsah uhlíku v buňkách mikrořas
$c_d$	—	součinitel odporu
$d$	$m$	průměr koule o objemu bubliny
$d_b$	$m$	průměr bubliny
$d_h$	$m$	průměr trysky
$F_b$	N	vztlaková síla
$F_d$	N	odporová síla
$F_i$	N	setrvačná síla
$F_m$	N	síla způsobená momentem hybnosti plynu
$F_p$	N	tlaková síla
$F_s$	N	síla od povrchového napětí
$g$	$m \cdot s^{-2}$	gravitační zrychlení
$H$	$m$	výška hladiny
$H_0$	$m$	počáteční výška hladiny
$L$	$m^4$	parametr
$M_C$	$g \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost uhlíku
$M_{CO_2}$	$g \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost oxidu uhličitého
$P$	$g \cdot l^{-1} \cdot den^{-1}$	produkce biomasy

<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$p_g$	$Pa$	tlak plynu
$p_l$	$Pa$	tlak kapaliny
$Q$	$min^{-1}$	vvm – objemový průtok plynu vztažený na jednotku objemu kultivačního média
$Re$	–	Reynoldsovo číslo
$S$	$m^3$	parametr
$T$	$m^5$	parametr
$t_b$	$s$	čas utvoření bubliny
$u$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost stoupání bubliny (12)
$u_b$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost stoupání bubliny (29)
$u_g$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost plynu v trysce
$u_{gr}$	$m \cdot s^{-1}$	mimovrstvová rychlost plynu
$V$	$m^3$	objem vsádky
$V_g$	$m^3$	objem bubliny
$V_l$	$m^3$	objem kapaliny unášené bublinou
$\dot{V}_g$	$m^3 \cdot s^{-1}$	objemový průtok plynu tryskou

## 12. Seznam řeckých symbolů

<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$\gamma$	$s^{-1}$	smyková rychlost
$\varepsilon_g$	—	zádrž plynu
$\nu_l$	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
$\mu_g$	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita plynu
$\mu_l$	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita kapaliny
$\rho_g$	$kg \cdot m^{-3}$	hustota plynné fáze
$\rho_l$	$kg \cdot m^{-3}$	hustota kapalné fáze
$\sigma$	$N \cdot m^{-1}$	povrchové napětí
$\tau$	$Pa$	smykové napětí
$\tau_{crit}$	$Pa$	kritické smykové napětí



## 13. Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Traťový systém [50] .....	14
<b>Obr. 2</b> Kaskádový systém [22] .....	15
<b>Obr. 3</b> Vertikální a horizontální trubkový fotobioreaktor [51] .....	16
<b>Obr. 4</b> Deskový fotobioreaktor .....	17
<b>Obr. 5</b> Válcový fotobioreaktor [12] .....	18
<b>Obr. 6</b> Pneumatická aerace [29] .....	21
<b>Obr. 7</b> Mechanické aerátory, a) schéma konstrukčních variant mechanického aerátoru [31], b) využití mechanického aerátoru v technologii čištění odpadních vod [33] .....	22
<b>Obr. 8</b> Hydropneumatické aerátory, a) schéma konstrukčních variant hydropneumatického aerátoru [29], b) využití hydropneumatického aerátoru v technologii čištění odpadních vod [33] .....	23
<b>Obr. 9</b> Plynopropustný fotobioreaktor [28] .....	23
<b>Obr. 10</b> Model bubliny přichycené k trysce [36] .....	24
<b>Obr. 11</b> Závislost zádrže plynu na mimovrstvové rychlosti [49] .....	31
<b>Obr. 12</b> Schéma zapojení deskového fotobioreaktoru v laboratorním měřítku [31] ....	33
<b>Obr. 13</b> Porovnání testovaných membrán [31] .....	34
<b>Obr. 14</b> Model poloprovozního fotobioreaktoru .....	37
<b>Obr. 15</b> Model aeračního elementu poloprovozního deskového fotobioreaktoru .....	38
<b>Obr. 16</b> Řez modelem aeračního elementu .....	38
<b>Obr. 17</b> Model aeračního členu v rámu fotobioreaktoru .....	39
<b>Obr. 18</b> Výroba a instalace aeračního členu a) výroba konstrukce, b) navlečení membrán, c) instalace aeračního členu do komory fotobioreaktoru .....	40
<b>Obr. 19</b> Průtokoměr ABB FAG6100 .....	42
<b>Obr. 20</b> Měření rychlosti bublin při objemovém průtoku $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	44
<b>Obr. 21</b> Měření velikosti bublin při objemovém průtoku plynu a) $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b) $\dot{V}_g = 18,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	45
<b>Obr. 22</b> Závislost rychlosti bublin na objemovém průtoku vzduchu .....	46
<b>Obr. 23</b> Závislost průměru bublin na objemovém průtoku vzduchu .....	47
<b>Obr. 24</b> Závislost zádrže vzduchu na objemovém průtoku .....	48
<b>Obr. 25</b> Bubliny způsobené netěsnostmi .....	49
<b>Obr. 26</b> Záznam provzdušňování při objemovém průtoku a) $\dot{V}_g = 2,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b) $\dot{V}_g = 4,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c) $\dot{V}_g = 7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	50
<b>Obr. 27</b> Záznam provzdušňování při a) $\dot{V}_g = 9,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , b) $\dot{V}_g = 12,13 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c) $\dot{V}_g = 14 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	51
<b>Obr. 28</b> Záznam provzdušňování při a) $\dot{V}_g = 16,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ b) $\dot{V}_g = 18,67 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , c) $\dot{V}_g = 21 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , d) $\dot{V}_g = 23,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .....	51

## 14. Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b> Výhody a nevýhody kultivačních systémů [5] [12] [24].....	19
<b>Tab. 2</b> Rozdělení typů pneumatické aerace [31] .....	20
<b>Tab. 3</b> Porovnání přibližného a přesného řešení výpočtu průměru bubliny pro systém voda – vzduch [36].....	28
<b>Tab. 4</b> Kritické hodnoty zvolených parametrů pro růst zelených řas [25] .....	32
<b>Tab. 5</b> Soupis materiálu pro výrobu aeračního členu.....	38
<b>Tab. 6</b> Výpočty průměru bubliny .....	41
<b>Tab. 7</b> Provozní parametry experimentu.....	43
<b>Tab. 8</b> Závislost smykové rychlosti a napětí na objemovém průtoku vzduchu .....	52

## 15. Seznam příloh

**Příloha 1** Záznam provzdušňování – detailní pohled.....Příloha1.MP4

**Příloha 2** Záznam provzdušňování – komora fotobioreaktoru.....Příloha2.MP4